



Experimentelle Bestimmung und numerische Simulation von Viskositäten in Schlackesystemen unter Vergasungsbedingungen

Thomas Nentwig

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK)
Werkstoffstruktur und -eigenschaften (IEK-2)

Experimentelle Bestimmung und numerische Simulation von Viskositäten in Schlackesystemen unter Vergasungsbedingungen

Thomas Nentwig

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 129

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-89336-756-6

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Bibliografische Daten
sind im Internet über <<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

Herausgeber und Vertrieb: Forschungszentrum Jülich GmbH
Zentralbibliothek, Verlag
D-52425 Jülich
Telefon (02461) 61-5368 · Telefax (02461) 61-6103
E-Mail: zb-publikation@fz-juelich.de
Internet: <http://www.fz-juelich.de/zb>

Umschlaggestaltung: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Copyright: Forschungszentrum Jülich 2011

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment Band / Volume 129

D 82 (Diss., RWTH Aachen University, 2011)

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-89336-756-6

Vollständig frei verfügbar im Internet auf dem Jülicher Open Access Server (JUWEL)
unter <http://www.fz-juelich.de/zb/juwel>

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder
in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder
unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

„Experimentelle Bestimmung und numerische Simulation von Viskositäten in Schlackesystemen unter Vergasungsbedingungen“

Kurzfassung

In vielen industriellen und natürlichen Prozessen finden sich Silikatschmelzen wieder: als Schlacken bei der Stahlproduktion und bei der Vergasung von Kohle, als Glas bei der Glasherstellung oder als Lava in der Vulkanologie. Rheologische Eigenschaften, wie die Viskosität, spielen eine entscheidende Rolle bei der Herstellung und Erstarrung dieser silikatischen Verbindungen. Ein allgemeines, gut funktionierendes Viskositätsmodell würde alle Wissenschaftler und Ingenieure auf diesem Gebiet bei der Prozesssimulation und -optimierung unterstützen.

Um dieses Ziel zu erreichen, ist es zunächst wichtig, Viskositätsmessungen an Schlackesystemen über weite Bereiche der Temperatur durchzuführen. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neues Hochtemperatur-Hochdruck-Rotationsviskosimeter aufgebaut, das für Messungen bis zu einer Temperatur von über 1600 °C und einem Druck von 20 bar ausgelegt ist. Gerade in Bezug auf die Kohlevergasung sind diese beiden Parameter entscheidend, da Vergasungsprozesse immer bei hohen Temperaturen und unter hohem Druck stattfinden. Mit dem neuen Viskosimeter sind Viskositätsmessungen unter realen Vergasungsbedingungen möglich.

Um die Funktionsweise des neu aufgebauten Rotationsviskosimeters zu demonstrieren, werden vier reale Schlacken systematisch untersucht. Dabei wird gemessen, welchen Einfluss der Druck und die Atmosphäre auf die Viskosität haben. Außerdem werden die gemessenen Viskositäten mit unterschiedlichen Modellrechnungen verglichen, es werden die Arrhenius- und die Weymann-Gleichung für die Systeme bestimmt und die Korrelation zwischen Viskosität und Basizität der Schlacken untersucht.

Im zweiten Teil der Arbeit wird ein neues Viskositätsmodell entwickelt, welches auf der Schlackenstruktur (Assoziatenmodell) aufbaut und mit vorhandenen thermodynamischen Modellen konsistent ist. Dabei wird zunächst eine detaillierte Literaturrecherche durchgeführt und das Modell für das System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ entwickelt. Die Qualität des neuen Modells wird über Vergleiche mit Messergebnissen aus der Literatur abgeschätzt und mit bereits bekannten Modellen verglichen.

„Experimental determination and numerical simulation of viscosities in slag-systems under gasification conditions“

Abstract

Silica melts are reflected in many different industrial and natural processes such as slags in steel production and gasification of coal, glass in the glass making industry, lava in the volcanology and in lots of other fields. Rheological properties like the viscosity of this silica melts are really important in all of these processes. A general and good working viscosity model would help all scientists and engineers, who have to simulate and optimise these processes.

First, it is important to have the possibility to measure viscosities of slags. As part of this PhD thesis a new high-temperature high-pressure rotational viscosimeter is developed for measurements up to $\geq 1600^\circ\text{C}$ and 20 bar. Particularly in relation to the coal gasification process this two parameters are really important, because coal gasification occurs under high temperatures and high pressures. With this new viscosimeter it is possible to measure slag viscosities under realistic gasification conditions.

To show that the new viscosimeter works quite good viscosity measurements of four real slags have been done. The influence of pressure and atmosphere on viscosity have been examined. The measurements are also compared with different viscosity models. The Arrhenius- and Weymann-Equation have been determined and the correlation between viscosity and basicity of the slag has been evaluated.

In the second part of the Phd thesis a new viscosity model is developed. The model is based on the structure inside the slag and consists in existing thermodynamic models. After a detailed literature research the model is developed for the $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ system. The quality of this new model is estimated by comparing calculated viscosity values with measurements found during the literature research. The new model is also compared with other existing models for viscosity calculation.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XIII
1. Einleitung	1
2. Stand des Wissens	5
2.1. Kohlevergasung und Schlackeentstehung	5
2.1.1. Umsetzung von Kohle	5
2.1.2. Eigenschaften der Schlacke	13
2.2. Messung von Viskositäten	21
2.2.1. Grundlagen der Rheologie	21
2.2.2. Rotationsversuche	24
2.3. Viskositäten von Schlacken	29
2.3.1. Grundlagen	29
2.3.2. Mathematische Modelle	32
2.3.3. Viskositäten von Modellschlacken	44
2.3.4. Viskositäten von natürlichen Schlacken	45
2.3.5. Druckabhängigkeit der Viskosität	46
2.3.6. Eingesetzte Viskosimeter zur Bestimmung von Schlackeviskositäten	48
3. Entwicklung und Aufbau der Messeinrichtung	49
3.1. Anforderungen an die Messeinrichtung	49
3.2. Mechanischer Aufbau	49
3.2.1. Druckbehälter und Ofen	50
3.2.2. Viskosimeter	53
3.2.3. Magnetkupplung	55
3.2.4. Tiegel-Spindel-Messsystem	56
3.3. Steuer- und Messsoftware	57
3.3.1. Benutzeroberfläche	57
3.3.2. Funktionsweise der Software	58
3.3.3. Auswertung der Messdateien	60
3.4. Testmessungen und Weiterentwicklung der Anlage	61
3.4.1. Testmessung zur Druckstabilität	61
3.4.2. Optimierung der Magnetkupplung	62

3.4.3.	Optimierung der Isolierung	65
3.5.	Kalibrierung und Testmessung mit realen Gläsern	66
3.5.1.	Kalibrierung mit Kalk-Soda-Glas G1 der PTB	67
3.5.2.	Referenzmessung mit Standardglas I der DGG	69
3.5.3.	Abschätzung der Messgenauigkeit	71
3.6.	Diskussion zu weiteren Optimierungsmöglichkeiten der Messeinrichtung	72
3.6.1.	Verbindung des Rheometers mit dem Ofengestell	72
3.6.2.	Designänderungen am Druckbehälter	73
3.6.3.	Designänderungen am Ofen innerhalb des Druckbehälters	74
4.	Präparations- und Untersuchungsmethoden	77
4.1.	Elementanalyse der Proben	77
4.2.	Abschreckversuche	77
4.2.1.	Probenpräparation	78
4.2.2.	Versuchsdurchführung	78
4.2.3.	Probenanalyse	79
4.3.	Viskositätsmessungen	80
4.3.1.	Probenpräparation	80
4.3.2.	Messung	80
4.3.3.	Tiegelreinigung	80
5.	Untersuchungen realer Schlacken	81
5.1.	Charakterisierung der Proben	81
5.2.	Abschreckversuche	83
5.2.1.	Schlacke K2-5	84
5.2.2.	Schlacke S1-1	84
5.2.3.	Schlacke S1-2	85
5.2.4.	Schlacke S1-4	86
5.3.	Viskositätsmessungen	86
5.3.1.	Schlacke K2-5 bei unterschiedlichen Drücken	86
5.3.2.	Schlacke S1-1 bei unterschiedlichen Atmosphären	87
5.3.3.	Vergleich von Viskositätsmessungen mit Modellberechnungen	88
5.3.4.	Bestimmung der Arrhenius- und der Weymann-Gleichungen	90
5.3.5.	Viskosität und Basizität	91
6.	Entwicklung eines Modells zur Berechnung von Viskositäten	93
6.1.	Theoretische Grundlagen und Vorgehensweise	93
6.1.1.	Berechnungsmethoden der unterschiedlichen Modelle	93
6.1.2.	Mathematische Beschreibung	95
6.1.3.	Vorgehensweise bei der Modellentwicklung	98
6.2.	Literaturrecherche und Datenselektion für die Modellentwicklung	99
6.3.	Bestimmung der Variablen	102
6.4.	Qualität des neuen Modells	106
6.5.	Vergleich des neuen Modells mit bereits in der Literatur vorhandenen Modellen	123

7. Zusammenfassung und Ausblick	137
7.1. Entwicklung und Aufbau des Hochtemperatur-Hochdruck-Viskosimeters . . .	137
7.2. Messung realer Schlackesysteme	138
7.3. Entwicklung des Modells für Viskositätsberechnungen	138
Literaturverzeichnis	141
A. Anhang	XV

Abbildungsverzeichnis

1.1. Statistische Reichweite nicht-erneuerbarer Energieträger	1
1.2. Entwicklung des Strombedarfs und Zukunftsprognose von 1980 bis 2035	2
1.3. Entwicklung der Stromerzeugung nach eingesetztem Rohstoff und Region zwischen 2008 und 2035	3
2.1. Chemische Grundlagen der Kohlevergasung	8
2.2. Aufbau eines IGCC-Kraftwerks	10
2.3. Schematische Darstellung des IGCC-Prozesses mit und ohne integrierter Heißgasreinigung	11
2.4. Schema der Verschlackung und Temperaturverlauf in einer Vergaserwand	12
2.5. Phasendiagramm des ternären Schlackesystems $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	15
2.6. Schematische Darstellung des $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Tetraeder	16
2.7. Mesomerien im $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Komplex	17
2.8. Reaktion von zwei $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Tetraedern zu $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$ und O^{2-}	17
2.9. Schematische Darstellung der Trennstellen bei ein- und zweiwertigen Kationen	18
2.10. Schmelzpunkt und Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur für Schlacken unterschiedlicher Basizität	20
2.11. Darstellung des Zwei-Platten-Modells	22
2.12. Schubspannung und Viskosität in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit . . .	23
2.13. Darstellung unterschiedlicher Rotations-Messsysteme	24
2.14. Darstellung von Searle- und Couette-Methode	27
2.15. Geometrie des Zylinder-Messsystems	28
2.16. Temperaturabhängigkeit der Viskosität bei unterschiedlichen Schlacketypen .	31
2.17. Darstellung der Q-Spezies	43
2.18. Ergebnis der SciGlass Recherche	45
2.19. Kommerzielles Hochtemperatur-Viskosimeter von Bähr-Thermoanalyse GmbH	48
3.1. Aufbau und schematische Darstellung der Messeinrichtung	50
3.2. Druckbehälter mit Manometer, Berstscheibe und aufgesetzter Magnetkupplung	51
3.3. Gasversorgung der Messeinrichtung	52
3.4. Ofenaufbau innerhalb des Druckbehälters	53
3.5. Rheometer RC1 der Firma RheoTec	54
3.6. Schematischer Aufbau der Magnetkupplung bmd300	55
3.7. Tiegel-Spindel-Messsystem aus Molybdän	56
3.8. Benutzeroberfläche der Steuer- und Messsoftware	58

3.9. Funktionsweise der Software	59
3.10. Excel-Sheet zur Auswertung der Viskositätsmessungen	60
3.11. Testmessung zur Druckstabilität bei 7, 8 und 9 bar über fünf Stunden	62
3.12. Drehmoment-Drehzahl-Verhalten der Magnetkupplung	63
3.13. Benötigtes Drehmoment von Standard- und Keramik-Kugellagern in Abhängigkeit der Drehzahl	64
3.14. Drehmomentschwankung der Magnetkupplung mit Standard- und Keramik-Kugellagern bei 150 U/min	65
3.15. Isolation zwischen Heizelementanschlüssen und Heizraum	66
3.16. Drehmoment-Temperatur-Diagramm von Kalk-Soda-Glas G1 bei 50 U/min	67
3.17. Drehmoment-Viskosität-Diagramm von Kalk-Soda-Glas G1 bei 50 U/min	68
3.18. Viskosität-Drehmoment-Diagramm von Kalk-Soda-Glas G1 bei 50 U/min mit logarithmischem Fit	68
3.19. Temperatur-Viskositäts-Diagramm der Referenzmessung mit Standardglas I	70
3.20. Verbindung des Rheometers mit dem Ofengestell	72
3.21. Schematische Darstellung von Druckbehälter und Flanschbezeichnungen	73
3.22. Schematische Darstellung des Druckbehälters mit Ofenaufbau	75
4.1. Schematische Darstellung des Abschreckversuches	78
5.1. Dünnschliffe von Schlacke K2-5 bei unterschiedlichen Temperaturen	84
5.2. Dünnschliffe von Schlacke S1-1 bei unterschiedlichen Temperaturen	85
5.3. Dünnschliffe von Schlacke S1-2 bei unterschiedlichen Temperaturen	85
5.4. Dünnschliffe von Schlacke S1-4 bei unterschiedlichen Temperaturen	86
5.5. Viskositätsmessung der Schlacke K2-5 bei 4 und 7 bar	87
5.6. Viskositätsmessung der Schlacke S1-1 unter Ar-4 %H ₂ und Ar	88
5.7. Vergleich von Viskositätsmessungen und Modellrechnungen für reale Schlacken	89
5.8. Viskositätsmessungen der realen Schlacke	92
6.1. Methode der Viskositätsberechnung bei unterschiedlichen Modellen	93
6.2. Messdaten von Leko im SiO ₂ -Na ₂ O-System bei 1200 °C	98
6.3. Messdaten im SiO ₂ -Na ₂ O-System	100
6.4. Messdaten im SiO ₂ -Na ₂ O-System mit X _{SiO₂} = 0,61	100
6.5. Datenselektion am Beispiel des SiO ₂ -Na ₂ O-Systems mit X _{SiO₂} = 0,67	101
6.6. Verteilung der Assoziaten im System SiO ₂ -Al ₂ O ₃ bei 2000 °C	103
6.7. Verteilung der Assoziaten im System SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -K ₂ O bei 1800 °C mit festem 50 mol% Anteil SiO ₂	104
6.8. ln(η) _{sim} -ln(η) _{exp} -Diagramm für SiO ₂	106
6.9. Vergleich von Modellrechnungen für SiO ₂	107
6.10. ln(η) _{sim} -ln(η) _{exp} -Diagramm von Al ₂ O ₃	108
6.11. Vergleich von Modellrechnungen von Al ₂ O ₃	108
6.12. ln(η) _{sim} -ln(η) _{exp} -Diagramm des SiO ₂ -Al ₂ O ₃ Systems	109
6.13. Vergleich von Modellrechnungen im SiO ₂ -Al ₂ O ₃ System	110
6.14. Vergleich von Modellrechnungen im SiO ₂ -Al ₂ O ₃ System	110

6.15. $\ln(\eta)_{\text{sim}} - \ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramm des $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ Systems	111
6.16. Vergleich von Modellrechnungen im $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ System	112
6.17. Vergleich von Modellrechnungen im $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ System	112
6.18. $\ln(\eta)_{\text{sim}} - \ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramm des $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ Systems	113
6.19. Vergleich von Modellrechnungen im $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ System	114
6.20. Assoziatenverteilung im $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ System bei 1400°C	114
6.21. Vergleich von Modellrechnungen im $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ System	115
6.22. $\ln(\eta)_{\text{sim}} - \ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramm des $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ Systems	116
6.23. Vergleich von Modellrechnungen im $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ System	116
6.24. Vergleich von Modellrechnungen im $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ System	117
6.25. $\ln(\eta)_{\text{sim}} - \ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramm des $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ Systems	118
6.26. Vergleich von Modellrechnungen im $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ System	118
6.27. Vergleich von Modellrechnungen im $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ System	119
6.28. $\ln(\eta)_{\text{sim}} - \ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramm des $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ Systems	120
6.29. Vergleich von Modellrechnungen im $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ System	120
6.30. Vergleich von Modellrechnungen im $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ System	121
6.31. $\ln(\eta)_{\text{sim}} - \ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramm des $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ Systems	122
6.32. Vergleich von Modellrechnungen im $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ System	122
6.33. Vergleich der unterschiedlichen Modelle für SiO_2	123
6.34. Vergleich der unterschiedlichen Modelle für Al_2O_3	124
6.35. Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ System	126
6.36. Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ System	127
6.37. Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ System	129
6.38. Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ System . . .	130
6.39. Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ System . . .	132
6.40. Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ System . . .	133
6.41. Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ System	135

Tabellenverzeichnis

2.1. Unterschiede zwischen den einzelnen Typen der Kohlevergasung	6
2.2. Synthesegaszusammensetzung bei der Vergasung	9
2.3. Periodensystem der Elemente	14
2.4. Kation-Sauerstoff-Abstand, Feldstärke und Funktion der Schlacke-Hauptkomponenten	18
2.5. Vergleich von DIN- und Relativ-Messsystem	26
2.6. Messung und Modellrechnung der Viskosität für eine Silikatschlacke bei 1623 K	35
2.7. Konstanten zur Berechnung von α im Shaw-Modell	36
2.8. Literaturübersicht von Viskositätsmessungen an realen Schlacken unter reduzierenden Bedingungen	47
3.1. Gerätekonstanten m_n für unterschiedliche Drehzahlen	69
3.2. Referenzmessung und Referenzwerte im Vergleich	70
5.1. Ascheschmelzverhalten der realen Schlackesysteme unter reduzierenden Bedingungen	81
5.2. Zusammensetzung der realen Schlackesysteme	82
5.3. Abschreckversuche der realen Schlacken	83
5.4. Arrhenius- und Weymann-Gleichung für die realen Schlackesysteme	90
5.5. Basizität der realen Schlackesysteme	91
6.1. Assoziate im System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$	95
6.2. Nach der Selektierung vorhandene Daten für die Modellentwicklung im System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$	102
6.3. Modellparameter für das System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ nach der Optimierung	105

1. Einleitung

Schon 1991 stellte Rösler fest: „Die Kohle macht von der Vorratsseite fossiler Brennstoffe in der Welt etwa 84 %, von der derzeitigen Nutzung nur etwa 32 % aus. Sie wird also noch längere Zeit gebraucht werden, um unseren Rohstoff- und Energiebedarf zu decken“ [1]. Diese Aussage macht deutlich, welche wichtige Rolle die Kohle auch in Zukunft für unsere Energieversorgung spielen wird. Abbildung 1.1 zeigt die statistische Reichweite der nicht-erneuerbaren Energieträger im Vergleich. Es ist erkennbar, dass Kohle der Energieträger mit der größten Reserve-

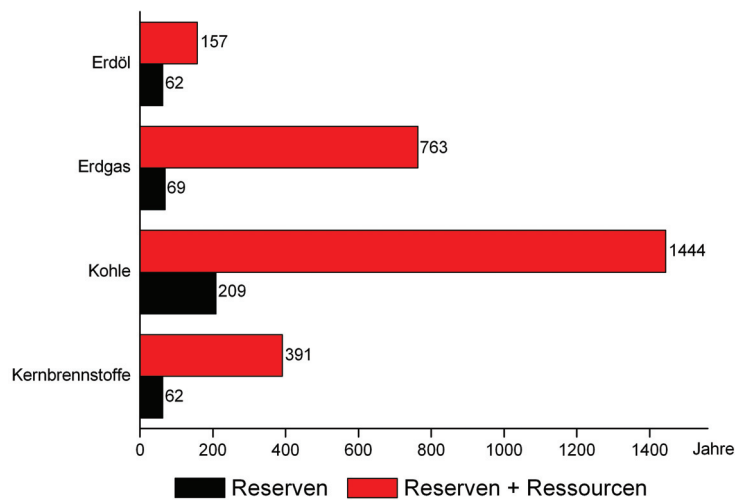


Abbildung 1.1.: Statistische Reichweite nicht-erneuerbarer Energieträger [2]

reichweite ist. Diese Einschätzung wird im Energiereport IV vom April 2005 bestätigt: „Die weitaus größten fossilen Energiepotenziale sind in Form von Kohlen verfügbar. Die Reichweite der Kohlereserven (Reserven bezogen auf heutige Jahresförderung; R/P-Verhältnis) beträgt mehr als 200 Jahre, die der Gesamtressourcen mehr als 1400 Jahre.“[2]

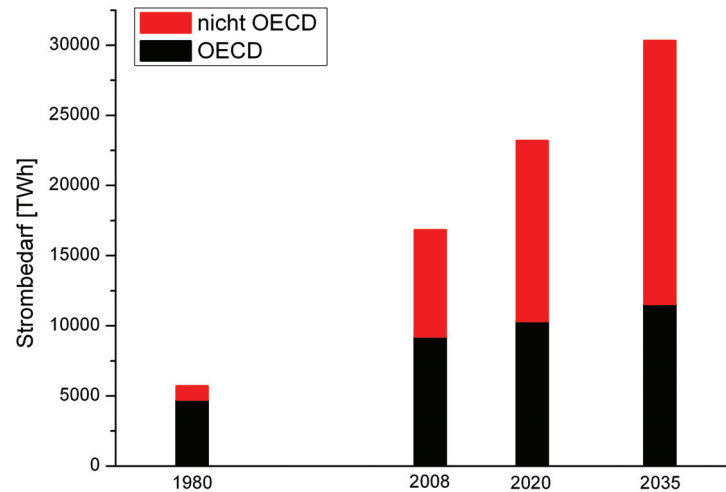


Abbildung 1.2.: Entwicklung des Strombedarfs und Zukunftsprognose von 1980 bis 2035 differenziert zwischen den Ländern der OECD und den nicht OECD-Ländern [2]

Wie Abbildung 1.2 zeigt, hat sich in den letzten 30 Jahren der weltweite Strombedarf fast verdreifacht. Insbesondere die Schwellenländer China und Indien werden auch in Zukunft für einen weiteren Anstieg sorgen. Bis zum Jahr 2035 wird sich der weltweite Strombedarf wahrscheinlich fast verdoppeln. [3]

Die Weltkarte 1.3 zeigt, wie sich in den einzelnen Regionen der Erde die Menge der erzeugten elektrischen Energie und die Art der Stromerzeugung zwischen 2008 und 2035 entwickeln wird. Auch wenn weltweit der aus Kohle erzeugte Strom von 41 % auf 32 % sinkt, macht dieser immer noch den größten Anteil aus. [3]

Immer wieder rückt der globale Klimawandel in den Mittelpunkt der Diskussion, wenn es um die Verstromung von Kohle geht. In der Gesellschaft hat die Kohlestromerzeugung nach wie vor ein „schmutziges“ Image. Dies ist durch mittlerweile oftmals veraltete Kraftwerke sicherlich nicht zu Unrecht der Fall. Um diesem negativen Image entgegenzuwirken, ist es nötig, den Wirkungsgrad von Kohlekraftwerken zu steigern und neue Kraftwerkstechniken zu entwickeln, die weniger CO₂ ausstoßen oder eine Speicherung von CO₂ ermöglichen. Eine Option mit hohem Wirkungsgradpotential bietet beispielsweise die Vergasung in einem IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) Kraftwerk.

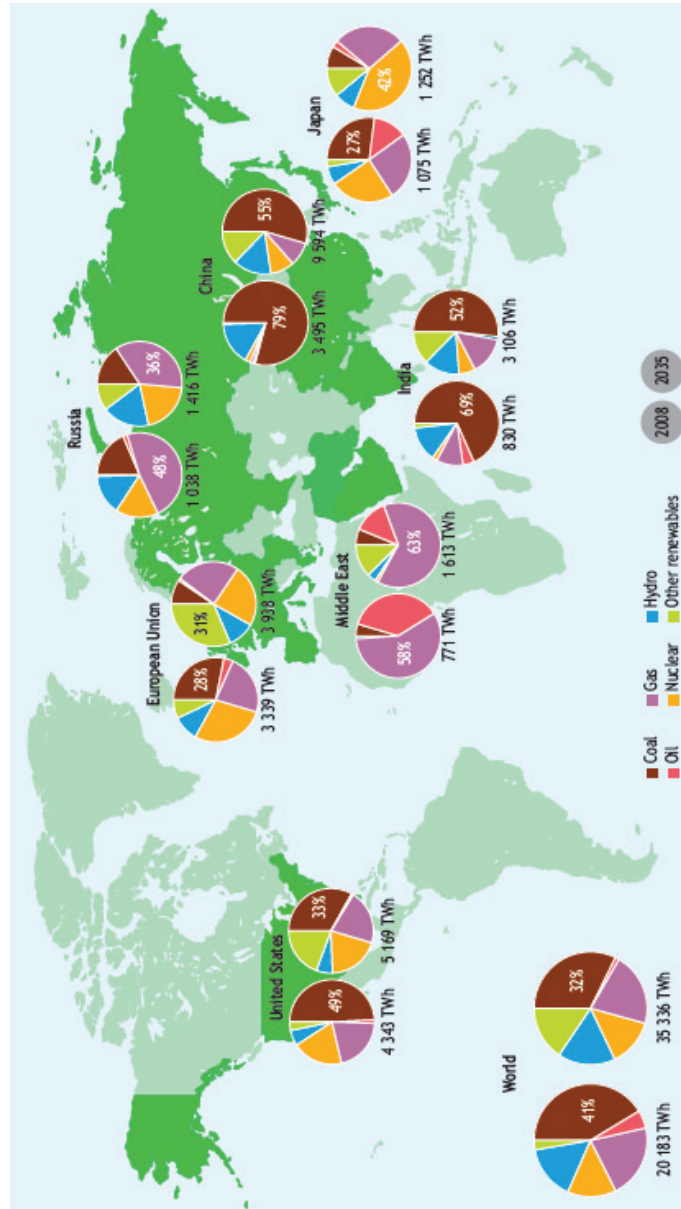


Abbildung 1.3.: Entwicklung der Stromerzeugung nach eingesetztem Rohstoff und Region zwischen 2008 und 2035 [9]

In Kohlekraftwerken selbst ist die Verschmutzung durch nach der Umsetzung zurückbleibende Asche ein generelles Problem. Die Kohle enthält organische und anorganische Bestandteile. Der organische Teil wird bei der Vergasung zum Synthesegas umgesetzt, der anorganische Mineralienrest bildet bei der Hochtemperatur-Vergasung (z.B. Flugstrom-Vergasung) flüssige Schlacke. Schlacke, die nicht im Vergaser abgeschieden wird, setzt sich z.B. an den Kesselrohren fest und verringert somit den Wärmeübergang, wodurch der Wirkungsgrad des Gesamtprozesses sinkt. Ein weiteres Problem stellen beim IGCC-Prozess die Anforderungen an das Synthesegas dar. Das heiße Gas muss möglichst sauber und frei von festen Bestandteilen sein, zu denen die Schlacke gehört. Hierfür soll zukünftig die flüssige Schlacke auf Keramikschüttungen abgeschieden werden.

Um das Verhalten der Schlacken im Vergaser verstehen und vorhersagen zu können, sind detaillierte Kenntnisse über die thermochemischen und -physikalischen Eigenschaften der Schlacke erforderlich. Genauso verhält es sich mit der Schlackeabscheidung auf den Keramikschüttungen. Auch auf diesem Gebiet sind weitere Fortschritte nur bei Kenntnis der genauen thermochemischen und -physikalischen Eigenschaften der Schlacke möglich. Eine der thermophysikalischen Eigenschaften ist die Viskosität der Schlacke. Sie gibt an, wie flüssig oder zäh eine Substanz ist (Honig ist beispielsweise zäher = viskoser als Wasser).

Als Vision sollte erreicht werden, die Prozessparameter vorherzusagen, die für eine optimale Vergasung der Kohle erforderlich sind. Im Kraftwerk würde dann die Zusammensetzung der im Prozess eingesetzten Kohle analysiert. Die so gewonnenen Daten würden von einer speziellen Software weiterverarbeitet werden, die den Vergasungsprozess der Kohle simuliert. Über die berechneten thermochemischen und -physikalischen Eigenschaften der Schlacke könnten die optimalen Prozessparameter bestimmt werden. Die Software würde dann beispielsweise Vergasungstemperatur, -druck und -atmosphäre, sowie Art der Keramikschüttung ausgeben, um die vorhandene Kohle optimal umzusetzen.

Gegenwärtig beruht die Einstellung der Prozessparameter auf umfangreichen empirischen Erfahrungen.

2. Stand des Wissens

2.1. Kohlevergasung und Schlackeentstehung

2.1.1. Umsetzung von Kohle

Konventionelle Prozesse zur Stromerzeugung In herkömmlichen Dampfkraftwerken wird die Kohle verbrannt und die entstehende Wärme wird dazu verwendet, Wasser in einem Rohrsystem zu erhitzen. Es entsteht überkritischer Dampf. Die modernsten der heute in Deutschland eingesetzten Kraftwerke arbeiten mit einer Dampftemperatur von bis zu 610 °C und einem Druck von 274 bar. Der gewonnene Dampf wird dazu verwendet, über einer Turbine zu entspannen und einen Generator anzutreiben. In Dampfkraftwerken werden mehrere Dampfturbinen in Reihe geschaltet, die jeweils für Hochdruck-, Mitteldruck- und Niederdruckdampf ausgelegt sind. Die so gewonnene Energie wird im Generator in elektrische Energie umgewandelt. Dabei wird ein Wirkungsgrad von 45 % erreicht [4]. Eine andere Möglichkeit, fossile Energie in elektrische umzuwandeln, besteht im Einsatz einer Gasturbine. Im Verdichter wird die angesaugte Luft komprimiert und in die Brennkammern geleitet. Dort wird zusätzlich das Brenngas eingeblasen, mit der Luft gemischt und verbrannt. Die unter hohem Druck stehenden Verbrennungsgase strömen in die Turbine und treiben diese an. Gasturbinen sind deutlich höheren Temperaturen (1200 bis 1500 °C) als Dampfturbinen ausgesetzt. Um einen zu schnellen Materialverschleiß zu verhindern, werden ihre Schaufeln mit einem eingespeisten Luftfilm gekühlt. Gasturbinen erreichen einen Wirkungsgrad von bis zu 38 %. Der Vorteil von Gasturbinen ist die Möglichkeit des sehr schnellen Anfahrens. Sie kommen daher oft für den elektrischen Spitzenbedarf zum Einsatz. Auch sind Gasturbinenkraftwerke billiger als Dampfkraftwerke gleicher Leistung [5]. Um den Wirkungsgrad weiter zu steigern, lassen sich die beiden Technologien der konventionellen Dampfkraftwerke und der Gasturbinenkraftwerke miteinander vereinen. Dann wird vom GuD Prozess gesprochen, was Gas- und Dampfturbinen Prozess bedeutet. Beim GuD Prozess werden eine Gas- und eine Dampfturbine hintereinander

geschaltet. Die Gasturbine treibt zunächst einen Generator an, wie dies auch in herkömmlichen Gasturbinenkraftwerken der Fall ist. Die Neuerung beim GuD Prozess ist die weitere Nutzung der Abwärme. Die noch sehr heißen Abgase der Gasturbine werden über einen Wärmetauscher auf einen Dampfkraftprozess übertragen. Moderne Gas-Kombi-Kraftwerke erreichen einen Wirkungsgrad von bis zu 59 % [6].

Techniken der Kohlevergasung Um Kohle im GuD-Prozess einsetzen zu können, ist die Umwandlung des festen Energieträgers Kohle in ein brennbares Gas notwendig. Hierfür kommt das technische Verfahren der Vergasung zum Einsatz, bei dem der Kohlenstoff nicht wie bei der Verbrennung vollständig in CO_2 umgewandelt wird, sondern zu großen Teilen CO und H_2 entstehen. Im Vergasungsreaktor reagiert die Kohle mit einem Sauerstoff-Wasserdampf-Gemisch. Die für die Vergasung benötigte Wärme wird im Reaktor selbst zur Verfügung gestellt, weshalb sie auch autotherme Vergasung genannt wird. Eine allotherme Vergasung, bei der die Wärme von außen dem Reaktor zugeführt werden würde, kommt großtechnisch nicht zum Einsatz [7]. Zunächst einmal muss zwischen verschiedenen Vergasungsverfahren für Kohle unterschieden werden. In Tabelle 2.1 ist eine Übersicht der gängigen Verfahren aufgeführt.

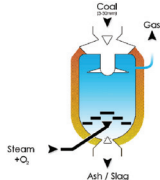
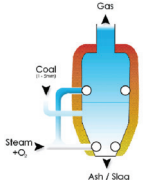
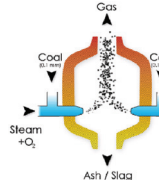
	Festbett- vergasung	Wirbelschicht- vergasung	Flugstrom- vergasung
			
Einsatzstoff	grobkörnig (3 bis 30 mm)	feinkörnig (1 bis 5 mm)	staubförmig ($<0,1$ mm)
Sauerstoffbedarf	gering bis mittel	mittel	hoch
Vergasungstemperatur am Rohgasaustritt	bis 1100 °C	bis 1000 °C	bis 1900 °C
Kohlenwasserstoff- zersetzung	kaum	überwiegend	vollständig
C-Vergasungsgrad	80 bis 90 %	80 bis 95 %	>95 %
Ascheaustrag	Asche oder Schlacke	Asche oder Agglomerate	Schlacke

Tabelle 2.1.: Unterschiede zwischen den einzelnen Typen der Kohlevergasung [8]

Beim Flugstromverfahren muss die Kohle aufgrund der geringen Verweildauer fein zermahlen werden ($<0,1\text{ mm}$). Danach wird sie entweder mit Wasser zu einer pumpfähigen Suspension (Feststoffgehalt 50 bis 70 %) vermischt oder im Flugstrom gefördert und anschließend im Reaktor vergast. Bei der Flugstromvergasung liegen die Vergasungstemperaturen im Bereich von 1500 bis 1900 °C. Es wird normalerweise mit reinem Sauerstoff und Dampf vergast. Aufgrund der hohen Temperaturen liegt die anfallende Asche in flüssiger Form als Schlacke vor. Weitere Verfahren bei der Kohlevergasung sind die Wirbelschichtvergasung und die Festbettvergasung. Die Verweilzeiten der Kohle sind bei diesen beiden Verfahren deutlich länger, weshalb auch die eingesetzten Kohlepartikel gröber sein dürfen. Verfahrensbedingt liegt die Vergasungstemperatur mit maximal 1100 °C deutlich unterhalb der Temperatur bei der Flugstromvergasung. Entsprechend erfolgt der Ascheaustrag meistens in fester Form. Aufgrund der höheren Ausbeute werden alle Arten der Kohlevergasung als Druckverfahren bei 15 bis 30 bar betrieben. Die Art der gewählten Vergasungsmethode hängt von der eingesetzten Kohleart bezüglich Temperatur und Verweilzeit ab. Braunkohle ist schon bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen von 800 bis 900 °C sehr reaktiv, so dass hier Wirbel- oder Festbettvergaser Verwendung finden. Für Steinkohle kommen hingegen hauptsächlich Flugstromvergaser zum Einsatz. Die meisten Vergasungsverfahren sind autotherm und werden mit Luft oder reinem Sauerstoff betrieben [8, 9].

Chemische Reaktionen bei der Kohlevergasung Die Kohlevergasung ist ein mehrphasiger Prozess, bei dem die Kohle in ein brennbares Gas umgesetzt wird (siehe Abbildung 2.1). Nach der Pyrolyse wird zunächst ein Teil des Kohlenstoffs mit Sauerstoff verbrannt. Dieser Vorgang läuft sehr schnell ab, ist aber wegen des begrenzten Sauerstoffangebots limitiert [10]. Bei der Verbrennung laufen folgende beiden Reaktionen ab [9]:



Es handelt sich um exotherme Reaktionen, bei der pro mol Kohlenstoff 406,1 kJ bzw. 126 kJ Energie frei werden. Die zweite Reaktion ist dabei schon eine Vergasungsreaktion von Kohlenstoff mit Sauerstoff [11]. In der nächsten Prozessphase findet die eigentliche Vergasung statt. Hier werden das entstandene CO_2 und der Wasserdampf mit dem Kohlenstoff zu H_2 und CO

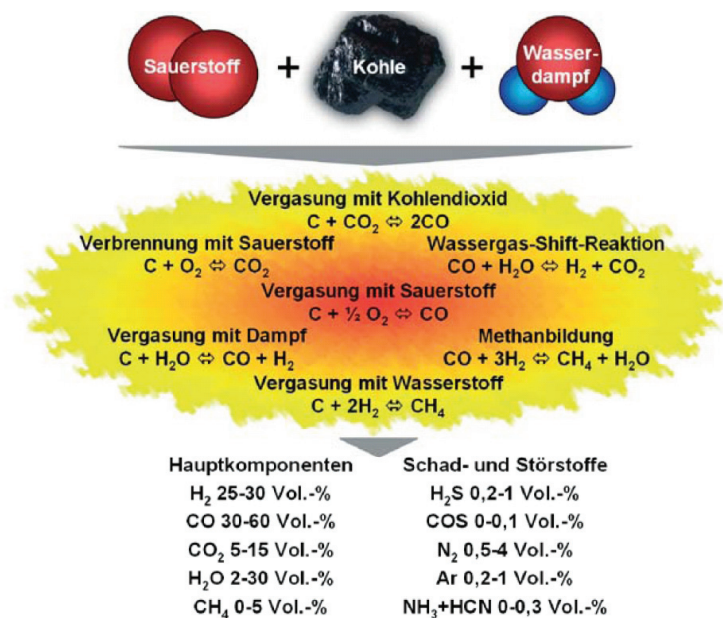
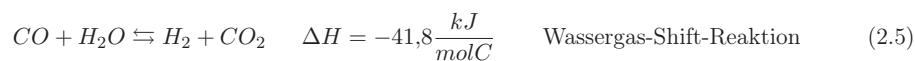
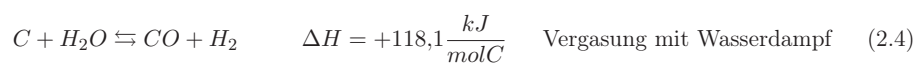
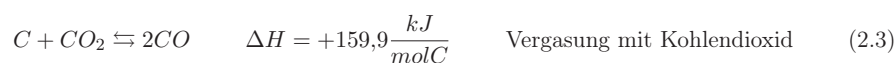


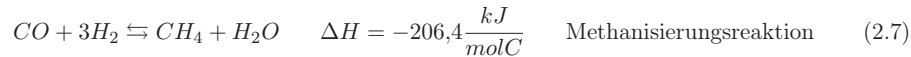
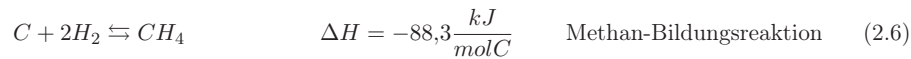
Abbildung 2.1.: Chemische Grundlagen der Kohlevergasung [7]

umgesetzt [10]. Es laufen dabei folgende Reaktionen ab [8]:



Diese Reaktionen laufen verhältnismäßig langsam ab [10]. Außerdem fällt auf, dass die beiden Reaktionen, bei denen nur CO und H₂ ohne CO₂ entstehen, endotherme Reaktionen sind.

Bei der Vergasung von Kohle wird außerdem nach folgendem Schema Methan gebildet [9]:



Insgesamt ergibt sich bei der Vergasung ein Synthesegas folgender Zusammensetzung [7]:

Hauptkomponenten		Schad- und Störstoffe	
H ₂	25-30 Vol.-%	H ₂ S	0,2-1 Vol.-%
CO	30-60 Vol.-%	COS	0-0,1 Vol.-%
CO ₂	5-15 Vol.-%	N ₂	0,5-4 Vol.-%
H ₂ O	2-30 Vol.-%	Ar	0,2-1 Vol.-%
CH ₄	0-5 Vol.-%	NH ₃ +HCN	0-0,3 Vol.-%

Tabelle 2.2.: Synthesegaszusammensetzung bei der Vergasung

Der IGCC-Prozess IGCC steht für Integrated Gasification Combined Cycle, was so viel bedeutet wie GuD-Kraftwerk mit integrierter Kohlevergasung. Beim IGCC Prozess handelt es sich also im Prinzip um ein GuD Kraftwerk. Die Gasturbine wird aber in diesem Fall nicht mit Erdgas sondern mit Synthesegas betrieben, welches durch die Vergasung von Kohle gewonnen wird. Der Prozess im IGCC-Kraftwerk läuft grundsätzlich in den vier Schritten Kohleaufbereitung, Vergasung, Gasaufbereitung und Gasnutzung ab. Zunächst muss die Auswahl der verwendeten Vergasungsmethode (siehe Tabelle 2.1 auf Seite 6) erfolgen, sie hängt u.a. vom verwendeten Brennstoff ab. Die Kohle wird im ersten Schritt zusammen mit Sauerstoff aus der Luftzerlegungsanlage und Wasser vergast (Abbildung 2.2 (1)). Die entstehende Schlacke wird vom Rohgas getrennt. Nach der Vergasung enthält das Rohgas aber noch sehr viele Stör- und Schadstoffe, so dass zunächst eine Reinigung erfolgen muss (Abbildung 2.2 (2)). Bei der Reinigung werden zunächst alle festen und flüssigen Partikel abgetrennt. Danach wird das Gas von Alkalien und Schwefel befreit. Auch lässt sich an dieser Stelle des IGCC-Prozesses das CO₂ abtrennen. Nach der Gasaufbereitung wird das Reingas einer Gasturbine zugeführt (Abbildung 2.2 (3)). Die Restwärme gelangt zusammen mit dem Prozessdampf aus dem Vergaser in einen Abhitzedampferzeuger (Abbildung 2.2 (4)), wo der Dampf für die nachgeschaltete Dampfturbine (Abbildung 2.2 (5)) erzeugt wird. IGCC-Kraftwerke sollen in Zukunft Wirkungsgrade von

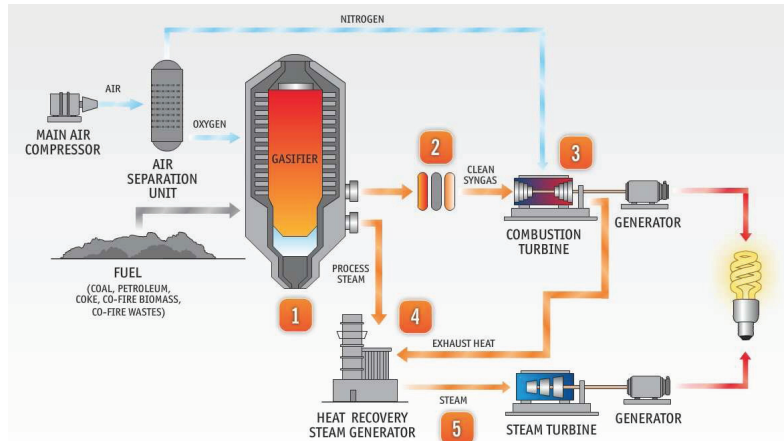


Abbildung 2.2.: Aufbau eines IGCC-Kraftwerks mit Vergaser (1), Gasaufbereitung (2), Gasturbine (3), Abhitzedampferzeuger (4) und Dampfturbine (5) [12]

über 55 % erreichen. Damit sind sie im Vergleich zu konventionellen Kohlekraftwerken deutlich effizienter. Außerdem lässt sich wegen der sorgfältigen Gasreinigung bei den IGCC-Prozessen eine CO_2 -Abtrennung technisch einfach und betriebswirtschaftlich kostengünstig integrieren, da das Synthesegas unter Druck steht und nicht mit Stickstoff verdünnt ist [7, 12]. Problematisch bei der IGCC-Technologie ist momentan die geringere wirtschaftliche Rentabilität. Hauptziel der Forschung und Entwicklung ist daher die Verschlinkung des Gesamtprozesses [13]. Eine hierfür mögliche Technologie ist die integrierte Heißgasreinigung. In Abbildung 2.3 sind der jetzige und der geplante Prozess von IGCC-Kraftwerken im Vergleich schematisch dargestellt. Bei aktuellen IGCC-Demonstrationsanlagen muss das Synthesegas nach der Vergasung zunächst abgekühlt werden. Danach findet die Entstaubung und Entschwefelung statt, bevor das Gas vor dem CO-Shift wieder aufgeheizt wird. Nun wird das Gas erneut abgekühlt, um die CO_2 -Abtrennung zu ermöglichen. Im letzten Schritt ist eine erneute Aufheizung nötig, bevor das Gas dem GuD-Prozess zugeführt werden kann. Bei der integrierten Heißgasreinigung findet die Vergasung schon bei deutlich höheren Temperaturen und Drücken statt. Das heiße Gas wird als erstes von Alkalien und Schlackeresten befreit. Jetzt ist eine erste Abkühlung erforderlich, bevor die Entschwefelung bei etwa 700°C durchgeführt werden kann. Im nächsten Schritt findet dann ein Hochtemperatur CO-Shift bei über 500°C mit gleichzeitiger CO_2 -Abtrennung statt. Das noch heiße Gas wird jetzt dem GuD-Prozess zugeführt. Bei der integrierten Heißgasreinigung ist also während des gesamten Prozesses kein unnötiges

Aufheizen des Synthesegases erforderlich.

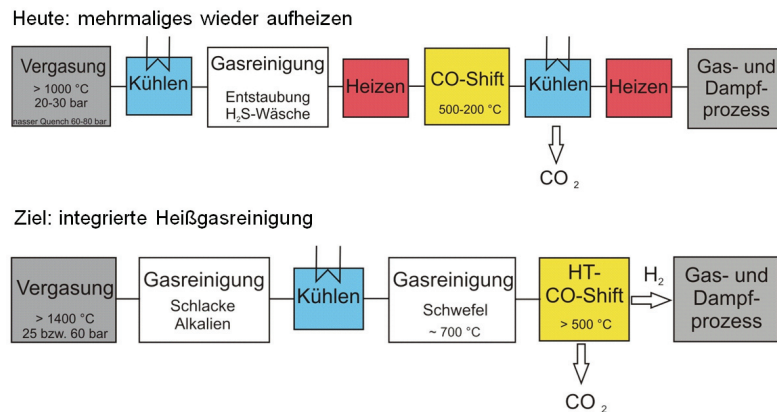


Abbildung 2.3.: Schematische Darstellung des IGCC-Prozesses mit und ohne integrierter Heißgasreinigung [14]

Was ist Schlacke? Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, wird bei der Umsetzung der Kohle der organische Teil oxidiert. Die anorganischen Komponenten erfahren die verschiedensten chemischen Reaktionen. Diese Rückstände der Mineralstoffsubstanz werden Asche genannt. Dies ist auch der Grund, weshalb die Bestandteile der Mineralstoffsubstanz als Aschebildner bezeichnet werden. Die Asche kann in unterschiedlichsten Aggregatzuständen (fest, flüssig) und Phasen (amorph, kristallin) vorliegen. Auch muss die Asche nicht immer genau einen Zustand haben, sondern kann Mischformen annehmen. Bei der Flugstromvergasung sind die Temperaturen so hoch, dass die Asche zum Teil oder vollständig flüssig ist. Diese aufgeschmolzene aber auch die nach dem Aufschmelzen wieder erstarrte Asche wird Schlacke genannt. In kohlestaubgefeuerten Kraftwerken sind 90 bis 95 % der Flugasche amorph. Dieser amorphe Anteil besteht hauptsächlich aus silikatischen Gläsern [15].

Verschlackungsmechanismus bei der Vergasung Die Verschlackung ist ein grundsätzliches brennstoffbedingtes Problem der Flugstromvergasung. Der Vorgang ist in Abbildung 2.4a dargestellt. Das Verfahren der Flugstromvergasung zeichnet sich durch eine hohe Durchsatzrate der Kohle aus. Dadurch haben die Kohlepartikel nur eine sehr kurze Verweildauer und damit kurze Reaktionszeiten im Reaktor. Die Kohle wird dementsprechend fein gemahlen. Die

Temperaturen in der Umsetzungszone des Vergasers sind höher als die Schmelztemperaturen der meisten Bestandteile der Mineralstoffsubstanz. Somit kommt es zur Bildung von flüssigen Aschetropfen, die auch als Flugschlacke bezeichnet werden. Nicht aufgeschmolzene Körner werden als Flugasche bezeichnet. Zu Beginn des Vergasungsprozesses besteht ein großes

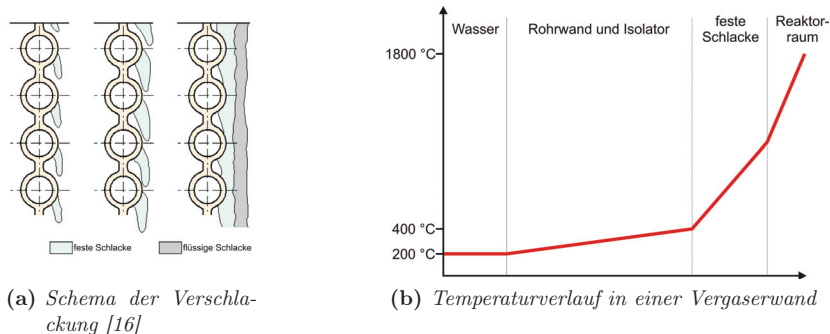


Abbildung 2.4.

Temperaturgefälle im Vergaser: die Kühlwandoberfläche hat eine Temperatur von nur 200 bis 400 °C, wohingegen die Temperatur innerhalb des Vergasers bis zu 1800 °C betragen kann. Dieser große Temperaturgradient führt bereits während des Fluges zur Abschreckung und damit einer Granulierung der Flugschlacketeilchen. Nur sehr feine Flugascheteilchen und ein Teil der kondensierten Mineralstoffsubstanz haften an der kalten Reaktorwand. Es bildet sich eine faserige und blättrige Struktur und die Wand wird mit der Zeit von einer dünnen, porösen und rauen Primärschlackeschicht überzogen. Durch die guten wärmeisolierenden Eigenschaften dieser Schlackeschicht kommt es zu einer Erhöhung der Wandtemperatur. Abbildung 2.4b zeigt den Temperaturverlauf innerhalb des Kühlwand-Schlackeschicht-Systems. Der starke Anstieg innerhalb der festen Schlackeschicht ist deutlich erkennbar. Prallt die Flugschlacke jetzt auf diese wärmere Primärschlackeschicht, so führt die Kontaktabbreckung zu einer Schrumpfung der Partikel. Ist diese Kontraktion des Schlacketeilchens zu groß, kann es nicht an der Wand haften bleiben. Bei manchen Teilchen ist die Größenverringerng jedoch so klein, dass sie an der Wand hängen bleiben. Diese Schlacketröpfchen haben eine andere chemische Zusammensetzung mit einem höheren Schmelzpunkt. Die feste Schlackeschicht wird somit erweitert und es entsteht eine zweite Schlackeschicht, die verglichen mit der Primärschicht wesentlich fester ist und punktförmig und verkittet aussieht. Wächst diese zweite Schicht weiter, so steigt auch die Temperatur der Wand weiter an und immer mehr Flugschlacketröpfchen können an ihr hängen bleiben. Die Wandtemperatur steigt so lange weiter an, bis die Bildungstemperatur

der ersten niedrigschmelzenden eutektischen Silikate erreicht ist. Jetzt geht ein Teil der festen Schlackeschicht in die flüssige Phase über. Die Wandoberfläche wird nass und klebrig und es finden chemische Reaktionen zwischen fester und flüssiger Phase statt. Die Schmelze wirkt wie ein Lösungsmittel für die festen Komponenten der ursprünglichen Flugschlacke. Es bildet sich eine neue mineralische Phase. Dieser Vorgang dauert bis zur Übersättigung durch hochschmelzende Komponenten und eine dadurch hervorgerufene Wiedererstarrung der Schmelze. Die feste Wandablagerung wird dicker und die Wandtemperatur steigt weiter. Irgendwann wird die Temperatur erreicht, bei der die flüssige Schicht allein durch die Schwerkraft an der Wand nach unten läuft. Der gesamte Vorgang von der Bildung einer festen Schlackeschicht auf der Kesselwand bis zu einer darauf entstehenden flüssigen nach unten fließenden Schlackeschmelze (Bild 2.4a) wird im allgemeinen als Verschlackung bezeichnet. Bei einer Viskosität $\ln(\eta) > 4,6$ ist die Schlacke zu zäh, um selbstständig durch die Schwerkraft abzufließen. Ein einfaches Abfließen ist erst bei Viskositäten $\ln(\eta) < 3,2$ möglich [16, 17].

Definitionsklärung Im Zusammenhang mit Viskositäten wird in der Literatur sehr oft der Logarithmus verwendet. Da es von einheitenbehafteten Größen keinen Logarithmus gibt, müsste die mathematisch korrekte Schreibweise $\ln\left(\frac{\text{Messgröße mit Einheit}}{\text{Einheit}}\right)$, also im Fall von Viskositäten beispielsweise $\ln\left(\frac{\eta}{\text{Pas}}\right) = \ln\left(\frac{100 \text{ Pas}}{\text{Pas}}\right) = 4,6$ lauten. In dieser Arbeit wird für eine bessere Übersicht auf die Division durch die Einheit verzichtet und das Beispiel wird als $\ln(\eta) = \ln(100 \text{ Pas}) = 4,6$ geschrieben. Auch kann der Ausdruck $\ln(\eta)$ als „Viskosität“ anstatt als „Logarithmus der Viskosität“ bezeichnet werden.

2.1.2. Eigenschaften der Schlacke

Chemische Zusammensetzung und Aufbau der Schlacke Die Schlacke ist ein Stoffgemisch aus den unterschiedlichen Oxiden der Mineralstoffe der Kohle. Bei der Vergasung liegt die Schlacke wegen der hohen Temperaturen von bis zu 1800 °C oft im flüssigen Aggregatzustand vor. Hauptbestandteile sind Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , MgO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 und SO_3 [18, 19, 20]. Die Oxide werden in Abhängigkeit von ihrem Reaktionsverhalten in wässriger Lösung in drei Gruppen unterteilt: alkalische, saure und amphotere Oxide [21].

Im Periodensystem der Hauptgruppenelemente (siehe Tabelle 2.3) ist zu erkennen, dass innerhalb der Periode mit steigender Ordnungszahl der Elemente die alkalischen Eigenschaften der wässrigen Lösungen ihrer Oxide abnehmen, die sauren Eigenschaften nehmen entspre-

H							He
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra						

	alkalisch		sauer
	amphoter		keine Oxide

Tabelle 2.3.: Periodensystem der Elemente und Eigenschaften der Oxide höchster Oxidationsstufen in wässriger Lösung [21]

chend zu. Innerhalb der einzelnen Hauptgruppen nehmen mit steigender Ordnungszahl der Elemente die alkalischen Eigenschaften der wässrigen Oxidlösungen zu, die sauren Eigenschaften nehmen ab [21]. Die hier nicht aufgeführten aber in der Schlacke häufig vorkommenden Nebengruppenelemente Titan und Eisen zeigen in wässrigen Oxidlösungen amphoterer Verhalten [22]. Basische Oxide werden ausschließlich von Metallen gebildet. CaO , MgO , Na_2O und K_2O sind die typischen Vertreter in der Schlacke. Die sauren Oxide werden von Halbmetallen und Nichtmetallen gebildet. Zu ihnen gehören unter anderem SiO_2 , P_2O_5 und SO_3 . Bei der Gruppe der amphoteren Oxide handelt es sich um Übergangsoxide, die in wässriger Lösung sowohl Basen als auch Säuren bilden können. Typische Vertreter sind Al_2O_3 und Fe_2O_3 [21]. Eine Besonderheit stellt das Eisen dar. Mit der Oxidationszahl 3 als Fe_2O_3 gehört es zu den amphoterer Oxiden. Liegt es jedoch als FeO mit der Oxidationszahl 2 vor, so gehört es zu den basischen Oxiden [23]. Quarz (SiO_2), Korund (Al_2O_3) und Kalk (CaO) bilden gemeinsam den größten Massenanteil der meisten natürlichen Kohleschlacken [18, 19, 20]. Für die Beurteilung der chemisch-physikalischen Schlackeeigenschaften muss das Phasendiagramm von $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ berücksichtigt werden. Abbildung 2.5 zeigt dieses Phasendiagramm. Der Schmelzpunkt der drei Oxide liegt weit oberhalb der Fließtemperatur üblicher Kohleschlacken. Ein Mischen der Oxide führt jedoch zu einer Herabsetzung der Schmelztemperatur. Das Phasendiagramm zeigt drei Regionen niedrigschmelzender Zusammensetzungen: Gehlenit ($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$), Anorthit ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) und Pseudo-Wollastonit ($\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$). Ihre Schmelzpunkte liegen unter 1500°C .

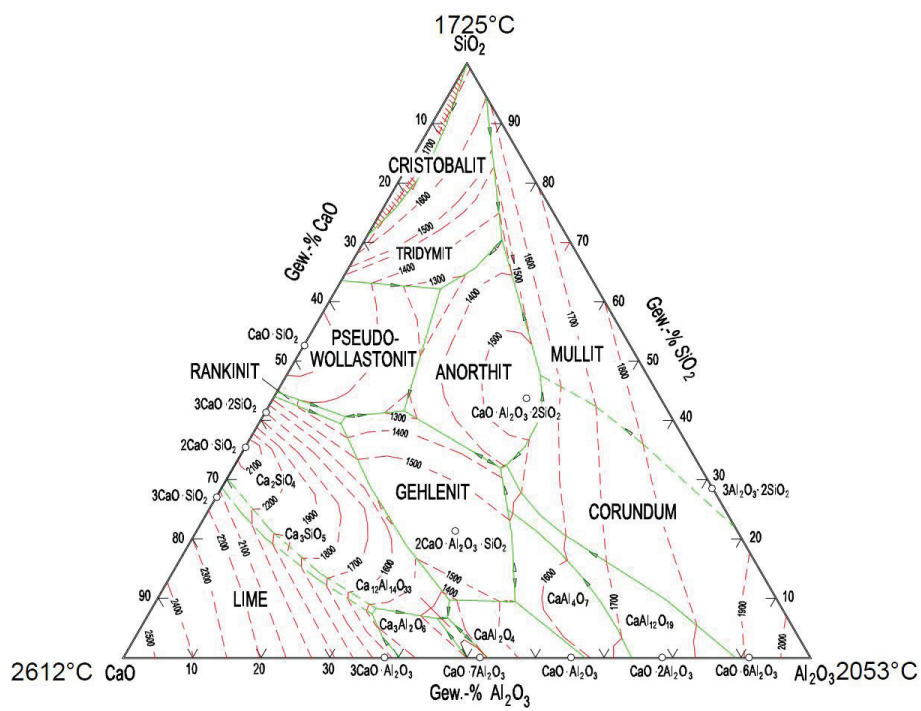


Abbildung 2.5.: Phasendiagramm des ternären Schlackesystems $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ [24]

Innerer Aufbau der Schlacke Nach früheren Vorstellungen über die innere Struktur von Schlacken bestehen diese aus einfachen basischen, sauren oder amphoteren Oxiden und aus stöchiometrischen Oxidverbindungen. In Schlackeschmelzen liegen Oxide und ihre Verbindungen als Moleküle mit untereinander schwachen Bindungen vor. Werden diese Bindungen vernachlässigt, so kann geschmolzene Schlacke als ideale Lösungen ihrer Oxide betrachtet werden [23].

Ionentheorie Nach heutigen Kenntnissen sind flüssige Schlacken nicht aus elektrisch neutralen Komponenten aufgebaut. Ihre molekularen Komponenten sind dissoziiert und bilden Ionen, ähnlich wie dies bei geschmolzenen Salzen der Fall ist [25]. Die Ionen der flüssigen Schlacke unterteilen sich in

- Kationen, z.B. Ca^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+
- Anionen, z.B. O^{2-} , S^{2-} , F^- , $(\text{SiO}_4)^{4-}$, $(\text{PO}_4)^{3-}$, $(\text{AlO}_3)^{3-}$, $(\text{FeO}_2)^-$

Diese Annahme wird auch als Ionentheorie bezeichnet [23].

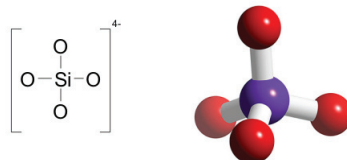
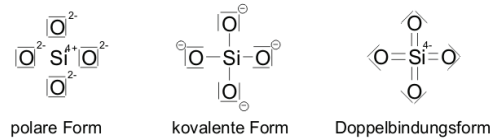
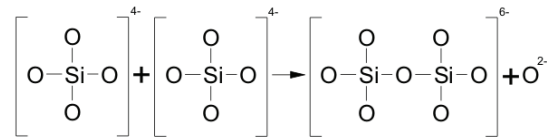


Abbildung 2.6.: Schematische Darstellung des $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Tetraeder [26]

Netzwerktheorie In sauren Schlacken bilden sich große Silizium-Sauerstoff-Komplexe. Insbesondere Silikatschlacken neigen stark zur Polymerisation. Grundlegendes Strukturelement ist das $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Tetraeder. Ein Si-Atom bildet mit vier O-Atomen einen Tetraeder, wobei die Sauerstoffatome um das Siliziumatom angeordnet sind (siehe Abbildung 2.6). Diese Silikat-tetraeder werden auch Insel- oder Neosilikat genannt. Innerhalb dieses $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Komplexes überlagern sich drei unterschiedliche Bindungsformen. Diese Mesomerie ist in Abbildung 2.7 dargestellt.

Mehrere $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Tetraeder können sich unter Abgabe von O^{2-} -Ionen verbinden. Als Beispiel ist in Abbildung 2.8 die Reaktion von zwei $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Tetraedern dargestellt. Das so entstan-

Abbildung 2.7.: Mesomerien im $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Komplex [27]Abbildung 2.8.: Reaktion von zwei $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Tetraedern zu $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$ und O^{2-} [26]

dene Gruppensilikat ist auch als Sorosilikat bekannt. Die Neosilikate können sich aber auch zu deutlich komplizierteren Formen verbinden. So gibt es isolierte Ringsilikate (Cyclosilikate), Kettensilikate (Inosilikate), Schichtensilikate (Phyllosilikate) und Gerüstsilikate. Die Sauerstoffatome, die einzelne Tetraeder miteinander verbinden, werden in diesen komplexen Silikatnetzwerken als Brückensauerstoff bezeichnet [27]. Die Polymerisation der Silizium-Sauerstoff-Systeme ist ein Gleichgewichtsprozess. Wird im System der SiO_2 -Gehalt erhöht oder ein vergleichbar wirkendes Oxid hinzugefügt, so nimmt der Polymerisierungsgrad zu. Oxide, die für einen höheren Polymerisierungsgrad sorgen, werden daher auch als Netzwerkbildner bezeichnet. Zu ihnen zählen neben dem Siliziumoxid auch das Bortrioxid (B_2O_3). Wird im System der Anteil der O^{2-} -Ionen erhöht, werden Si-O-Si Sauerstoffbrücken aufgebrochen und der Polymerisierungsgrad nimmt ab. Oxide, die den Sauerstoffionengehalt erhöhen, werden daher als Netzwerkwandler bezeichnet. Wichtige Vertreter dieser Gruppe sind z.B. Na_2O , K_2O , CaO und MgO . Eine dritte Gruppe sind die amphoteren Oxide, die sowohl als Netzwerkbildner als auch als Netzwerkwandler wirken können. Zu ihnen zählt beispielsweise das Aluminiumoxid (Al_2O_3) [23].

In Abbildung 2.9 ist schematisch die Auflockerung des $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Tetraeder-Netzwerks durch die Entstehung von Trennstellen dargestellt. Solche Trennstellen entstehen durch netzwerkwandelnde Oxide. In der Abbildung ist die Einbringung eines Na_2O -Moleküls dargestellt, welches eine Trennstelle zur Folge hat und die Einbringung von zwei CaO -Molekülen, die zwei Trennstellen hervorruft [22]. Je höher die Wertigkeit des Kations ist, desto mehr Trennstellen bildet es und desto stärker wird das Netzwerk aufgelöst. Dies hängt auch mit der Feldstärke zwischen

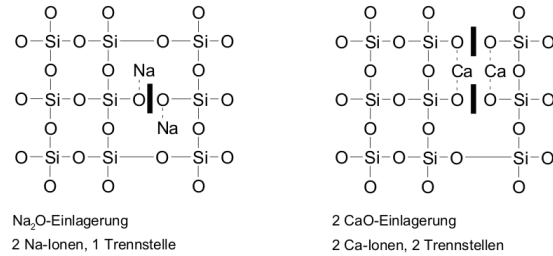


Abbildung 2.9.: Schematische Darstellung der Trennstellen bei ein- und zweiwertigen Kationen [28]

Kation und O²⁻-Anion zusammen. Diese lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$F = \frac{Z_K}{(r_K + r_{O^{2-}})^2} = \frac{Z_K}{a^2} \quad (2.8)$$

wobei Z_K die Valenzzahl des Kations, R_K , $r_{O^{2-}}$ die Ionenradien von Kation und Sauerstoffion und a den Kation-Sauerstoffion-Abstand darstellen. Tabelle 2.4 zeigt für die Hauptkomponenten der Schlacken den Kation-Sauerstoff-Abstand, die Feldstärke und welche Funktion die Komponente im Schlackesystem übernimmt [29].

Element	Wertigkeit	häufigste vorkommende Koordinations- zahl	Kationen- O ²⁻ - Abstand	Feldstärke im Abstand des O ²⁻ -Ions	Funktion in der Schlacke
K	1	8	2,77	0,13	Netzwerk- wandler
Na	1	6	2,30	0,19	
Ca	2	8	2,48	0,33	
Fe	2	6	2,15	0,43	
Mg	2	6	2,10	0,45	Netzwerk- wandler/ Netzwerk- bildner
		4	1,96	0,53	
Fe	3	6	1,99	0,76	
		4	1,88	0,85	
Al	3	6	1,89	0,84	Netzwerk- bildner
		4	1,77	0,96	
Si	4	4	1,77	1,57	Netzwerk- bildner

Tabelle 2.4.: Kation-Sauerstoff-Abstand, Feldstärke und Funktion der Schlacke-Hauptkomponenten [29]

Basizität Nach der Ionentheorie wird bei der Bildung komplexer Anionen durch die Aufnahme von O^{2-} das gesamte Ion negativ geladen. Bei der Bildung einfacher Kationen werden hingegen Elektronen in Form von O^{2-} abgegeben. Das Metallion reagiert bei der Bildung eines komplexen Anions sauer, bei der Bildung eines einfachen Kations basisch:



Netzwerkbildende Ionen reagieren normalerweise sauer, netzwerk wandelnde Ionen basisch. Oxide von Metallen mit mehreren Wertigkeitsstufen sind bei niedrigen Wertigkeiten eher basisch, bei höheren Wertigkeiten eher sauer. Eine besondere Rolle spielen bei der Basizität die amphoteren Oxide (z.B. Al_2O_3 , Fe_xO_y , Ti_xO_y). Sie können sowohl als Netzwerk wandler als auch als Netzwerkbildner wirken. Ihr Verhalten hängt vom O^{2-} -Angebot in der Schlacke ab [23]. „Welcher speziellen Fassung des Basizitätsbegriffs man auch den Vorzug geben will, immer ist zu betonen, dass keine der vorstehenden Definitionen einer theoretischen Erörterung standhalten kann.“ [30]. Diese Aussage von H. Schenk zeigt zwei wichtige Dinge, wenn es um die Basizität von Schlacken geht: Zum einen gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionen, was überhaupt unter der Basizität verstanden wird, und zum anderen handelt es sich bei der Basizität allerhöchstens um eine kennzeichnende Größe für eine grobe Einordnung einer Schlacke, nie jedoch um eine auch in der Theorie fest verankerte Eigenschaft. Die Basizität wird meistens durch das Verhältnis von basischen zu sauren molekularen Bestandteilen beschrieben [25]. Eine erste Definition für die Basizität liefert das Verhältnis zwischen CaO und SiO_2 :

$$B_1 = \frac{\%CaO}{\%SiO_2} \quad (2.11)$$

Diese erste Annäherung kann bei den in den meisten Schlacken existierenden Vielkomponentensystemen nur als eine erste grobe Abschätzung gesehen werden. Eine verbesserte Definition findet sich im Gießerei Lexikon [31], in dem zusätzlich die beiden Oxide MgO und Al_2O_3 mit einbezogen werden:

$$B_2 = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3} \quad (2.12)$$

Ein weiterer möglicher Netzwerkbildner ist das Titandioxid (TiO_2). Die basischen Oxide von Natrium und Kalium (Na_2O , K_2O) wirken hingegen als Netzwerk wandler. Außerdem wird das amphotere Eisenoxid in der Form FeO den basischen Netzwerk wandlern und als Fe_2O_3 den sauren Netzwerkbildnern zugeordnet. Insgesamt ergibt sich für die Basizität nach Nowok

[32] dann folgende Formel:

$$B_3 = \frac{\%CaO + \%MgO + \%Na_2O + \%K_2O + \%FeO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%TiO_2 + \%Fe_2O_3} \quad (2.13)$$

In der Literatur finden sich somit mehrere Formeln, die die Basizität über das Massenverhältnis von basischen und sauren Schlackekomponenten darstellen. Teilweise wird bei den Basizitätsformeln sogar ein Faktor berücksichtigt, der die Basen- bzw. Säurenstärke des jeweiligen Oxides gewichtet. In der vorliegenden Arbeit wird für Basizitätsberechnungen die Formel 2.13 verwendet.

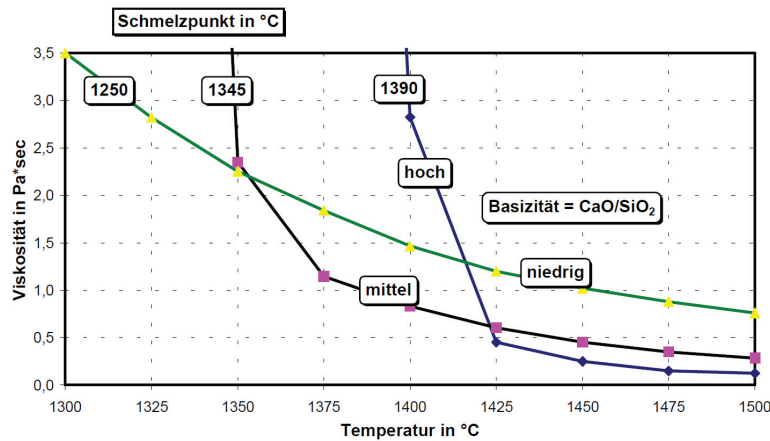


Abbildung 2.10.: Schmelzpunkt und Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur für Schlacken unterschiedlicher Basizität [33]

Viele Glaseigenschaften hängen von der Basizität ab. Im Detail gilt es noch als ungeklärt, welche Konsequenzen sich aus dem Konzept, Schlacken nach ihrer Basizität zu beurteilen, ergeben können [34]. Abbildung 2.10 zeigt, dass Schlacken mit hoher Basizität aufgrund ihrer Neigung zur Kristallbildung schneller zähflüssig werden als Schlacken mit niedriger Basizität. Dieses Verhalten zeigt sich im Viskositätsverlauf durch einen steileren Anstieg der Viskosität beim Herabsetzen der Temperatur. Auch sorgt eine höhere Basizität für einen höheren Schmelzpunkt [33]. Grundsätzlich gilt: je basischer die Schlacke ist, desto niedriger ist die Viskosität und der Schmelzpunkt. Dies trifft nicht auf alle Mengenverhältnisse zu [35].

2.2. Messung von Viskositäten

2.2.1. Grundlagen der Rheologie

Einleitung Das Wort Rheologie leitet sich aus dem griechischen rheos (der Fluss) und logos (die Lehre) ab und bedeutet soviel wie Fließkunde. Rheologische Untersuchungen umfassen das Fließverhalten von Flüssigkeiten und Schmelzen sowie das Deformationsverhalten von Festkörpern. Idealverhalten in der Rheologie ist das Fließen idealviskoser Flüssigkeiten (z.B. Mineralöl). Alle realen Substanzen zeigen ein Mischverhalten aus einem viskosen und einem elastischen Anteil. Die Rheologie ist erst seit dem 20. Jahrhundert eine eigenständige Wissenschaft. Jedoch wurden auch schon früher Untersuchungen auf diesem Gebiet durchgeführt. 75 v. Chr. erklärt Titus Lucretius Carus in einem Gedicht, dass das Fließ- und Gleitverhalten von Fluiden wie Wasser, Milch, Wein, Olivenöl und Honig von der Größe und der Form der Grundpartikel und deren Wechselwirkungen abhängt. Markus Reiner (1931, 1960) und George W. Scott Blair (1942) versuchen, alle Varianten rheologischen Verhaltens zu klassifizieren. Ziel der Rheologie ist die Messung des Fließ- und Deformationsverhaltens unterschiedlicher Substanzen und die Darstellung und Erklärung der Ergebnisse. Die Messtechnik zur Erfassung rheologischer Daten wird Rheometrie genannt. Sie befasst sich mit Messsystemen, Messgeräten und den Mess- und Auswertmethoden. Seit 1970 gibt es analog gesteuerte Programmgeber und online Schreiber zur Aufzeichnung von Fließkurven. Digital gesteuerte Geräte kommen seit 1980 zum Einsatz. Im Alltag gibt es viele rheologische Phänomene. Fallen Mineralöl, Knetmasse und eine Stahlkugel auf den Boden, zeigen die drei unterschiedlichen Substanzen völlig unterschiedliche Verhaltensweisen. Das Mineralöl verläuft (idealviskoses Verhalten), die Knetmasse verformt sich beim Aufprall (plastisches Verhalten) und die Stahlkugel springt hoch und bleibt unverformt (idealelastisches Verhalten). Auch bei einem Holzstab, der in einem mit einer Substanz gefüllten Becher steckt, zeigt sich je nach Substanz ein ganz spezielles Verhalten. Im Wasser kippt der Holzstab sofort zur Seite (niedrige Viskosität), in Silikon kippt der Stab sehr langsam zur Seite (mittlere Viskosität) und in Knetmasse bleibt der Stab still stehen (sehr hohe Viskosität) [36].

Das rheologische Verhalten einer Substanz hängt von sehr vielen äußeren Einflüssen ab:

- Art, Höhe und Dauer der Belastung
- Temperatur

- Konzentration (z.B. Feststoffpartikel in einer Suspension)
- Umgebungsdruck
- pH-Wert

Begriffsdefinitionen und Erklärungen Genauere Erklärungen zu den einzelnen Definitionen finden sich in Mezgers Handbuch der Rheologie [36] und Schramms „Einführung in Rheologie und Rheometrie“ [37]. Alle grundlegenden rheologischen Parameter werden über das Zwei-Platten-Modell (siehe Abbildung 2.11) definiert.

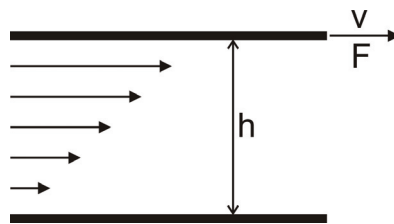


Abbildung 2.11.: Darstellung des Zwei-Platten-Modells mit der Scherfläche A , der Scherkraft F , dem Plattenabstand h und der resultierenden Geschwindigkeit v [36]

Rheologische Parameter lassen sich nur berechnen, wenn die folgenden beiden Scherbedingungen erfüllt sind:

1. die Messprobe hat an beiden Platten Wandhaftung (kein Rutschen oder Gleiten)
2. zwischen den Platten herrschen laminare Fließbedingungen (Schichtenströmung) ohne Turbulenzen

Die Schubspannung τ wird über den Quotienten aus Scherkraft F und Scherfläche A definiert.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \left[\frac{N}{m^2} = Pa \right] \quad (2.14)$$

Ihre Einheit ist Pascal (Pa).

Die Scherrate $\dot{\gamma}$ wird über den Quotienten aus der resultierenden Geschwindigkeit v und dem Abstand h zwischen den beiden Scherflächen definiert.

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} \quad \left[\frac{\frac{m}{s}}{m} = \frac{1}{s} \right] \quad (2.15)$$

Ihre Einheit ist s^{-1} . Mit differentiellen Größen ergibt sich $\dot{\gamma} = \frac{dv}{dh}$, wobei dv die Differenzgeschwindigkeit zweier benachbarter Schichten zwischen den beiden Scherplatten ist und dh die Dicke einer solchen Schicht angibt. dv und dh sind dabei konstant.

Die Viskosität ist ein Maß für die Zähigkeit. In einem Fluid werden die Moleküle gegeneinander verschoben. Die dabei entstehenden Reibungskräfte haben einen Fließwiderstand zur Folge. Die Scherviskosität η wird als

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \left[\frac{Pa}{s^{-1}} = Pa \cdot s \right] \quad (2.16)$$

definiert und hat die Einheit $Pa \cdot s$. Meist wird statt dem Begriff Scherviskosität nur der Begriff Viskosität verwendet. Für ein idealviskoses Fluid bei konstanter Temperatur ist die Viskosität eine Materialkonstante. Da die Viskosität sehr stark mit der Temperatur schwankt, werden in der Literatur oft logarithmische Werte verwendet, also $\ln(\eta)$ oder $\lg(\eta)$. In dieser Arbeit wird der natürliche Logarithmus der Viskosität $\ln(\eta)$ verwendet.

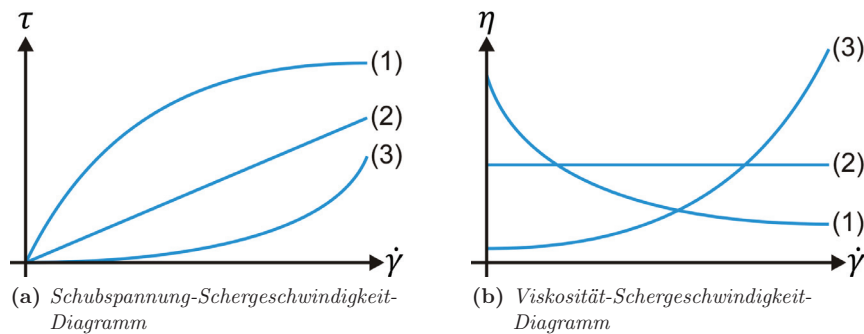


Abbildung 2.12.: Schubspannung und Viskosität in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit bei newtonschen (2) und nicht-newtonschen (1, 3) Fluiden

Rheologisches Verhalten Alle Materialien lassen sich hinsichtlich ihres rheologischen Verhaltens in zwei Hauptgruppen einteilen. Es wird zwischen newtonschen und nicht-newtonschen Fluiden unterschieden. Die Viskosität eines newtonschen Fluids ist unabhängig von Höhe und

Dauer der Scherbelastung. Ein Fluid mit diesem Verhalten wird auch als idealviskoses Fluid bezeichnet. Die formale Beschreibung erfolgt über das newtonsche Gesetz $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$. Der Fließwiderstand τ einer newtonschen Flüssigkeit ist proportional zur Fließgeschwindigkeit $\dot{\gamma}$, wobei die Viskosität η der Proportionalitätsfaktor ist [38]. Bei der Messung newtonscher Flüssigkeiten verläuft die Fließkurve linear. Abbildung 2.12 zeigt ein Schubspannung-Schergeschwindigkeit-Diagramm und das dazu passende Viskosität-Schergeschwindigkeit-Diagramm, welches der ersten Ableitung entspricht [36, 38]. Die meisten reinen Flüssigkeiten wie z.B. Wasser zeigen newtonsches Verhalten, aber auch Schlacken bei genügend hohen Temperaturen verhalten sich entsprechend. Bei Rotationsviskosimetern lässt sich newtonsches Verhalten am linearen Zusammenhang zwischen Drehzahl und gemessenem Drehmoment erkennen.

2.2.2. Rotationsversuche

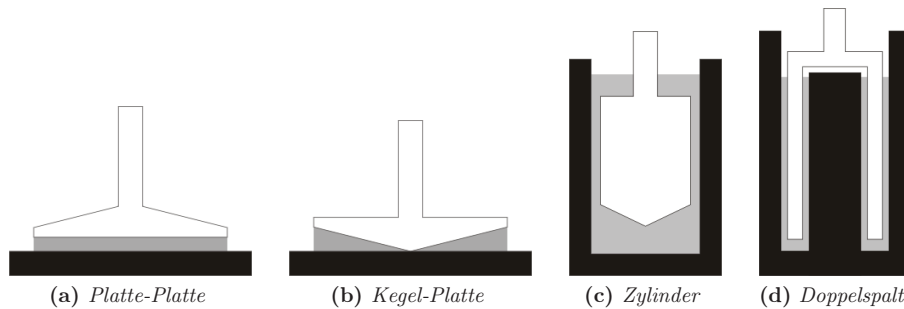


Abbildung 2.13.: Darstellung unterschiedlicher Rotations-Messsysteme mit rotierendem Körper (weiß), festem Teil (schwarz) und zu messender Probe (grau) [36]

Allgemeine Funktionsweise Um Viskositäten zu messen, kommen sogenannte Rheometer oder Viskosimeter zum Einsatz. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Typen, z.B. Rotations-Viskosimeter, Kapillar-Viskosimeter oder Kugelfall-Viskosimeter. Bei den Rotationsviskosimetern wird das zu prüfende Material zwischen zwei gegeneinander rotierende Flächen aufgebracht. Diese beiden Flächen können unterschiedliche Formen haben, so gibt es Platte-Platte- (Abbildung 2.13a) oder Kegel-Platte-Messsysteme (Abbildung 2.13b). Auch die Oberfläche eines rotierenden Körpers und die Innenfläche eines Bechers bilden ein Rotationssystem (Abbildung 2.13c). Sie werden zu den Zylinder-Messsystemen gezählt. Zu diesen Systemen zählt auch das Doppelspalt-Messsystem (Abbildung 2.13d). Generell wird bei den Rotationsviskosimetern über das für die Rotation aufgewendete Drehmoment bei unterschiedlichen Drehzahlen

die Viskosität bestimmt [37]. Mit Rotationsviskosimetern lassen sich unterschiedliche rheologische Verhalten messen:

- **Zeitabhängiges Fließverhalten:** Um das zeitabhängige Fließverhalten einer Probe zu untersuchen, wird am Rheometer eine konstante Drehzahl oder ein konstantes Drehmoment eingestellt. Gemessen wird über eine bestimmte Zeitspanne. Das Ergebnis ist je nach Vorgabe das zeitabhängige Drehmoment bzw. die zeitabhängige Drehzahl. Bei niedrigen Drehmomenten und Drehzahlen ist es wichtig, pro Messpunkt eine ausreichend lange Messzeit zu wählen, um Anlaufeffekte und zeitliche Übergangserscheinungen nicht zu übersehen. Werden Drehmoment oder Drehzahl zu hoch gewählt, kann es durch Schererwärmung zur Verfälschung des Messergebnisses kommen. Auch kann es zu turbulenten Strömungsveränderungen kommen, die ebenfalls das Messergebnis verfälschen. Versuche mit konstanter Drehzahl des Rheometers, sind zu bevorzugen, da sie sich besser reproduzieren lassen [36, 38].
- **Temperaturabhängiges Fließverhalten:** Bei der Untersuchung des temperaturabhängigen Fließverhaltens wird eine konstante Drehzahl oder ein konstantes Drehmoment vorgegeben. Zusätzlich wird ein Temperaturprogramm mit einer sich zeitlich ändernden Temperatur $T(t)$ durchgeführt. Gemessen wird über eine bestimmte Zeitspanne. Das Ergebnis ist ein temperaturabhängiges Drehmoment (bei konstanter Drehzahl) bzw. eine temperaturabhängige Drehzahl (bei konstantem Drehmoment). Hochviskose Substanzen zeigen eine stärkere Temperaturabhängigkeit als niederviskose. Schon sehr kleine Änderungen der Temperatur haben großen Einfluss auf die Viskosität. Wegen dieser starken Abhängigkeit ist es sehr wichtig, dass für jeden Messpunkt eine genaue Temperaturangabe vorliegt [36].
- **Druckabhängiges Fließverhalten:** In fast allen Fällen steigt die Viskosität eines Fluids mit zunehmendem Druck. Der Einfluss ist im Vergleich zur Temperaturabhängigkeit jedoch sehr gering. Eine Druckänderung von 0,1 MPa auf 30 MPa hat in etwa den selben Einfluss wie eine Temperaturänderung um 1 K. Je hochviskoser eine Flüssigkeit ist, desto stärker ist die Druckabhängigkeit. Hochviskose Flüssigkeiten haben Moleküle, deren Verzweigungsgrad sehr hoch ist. Durch einen hohen Druck nimmt das freie Volumen innerhalb der Struktur ab. Die Molekülbeweglichkeit wird eingeschränkt und die inneren Reibungskräfte werden erhöht. Dies hat eine höhere Viskosität zur Folge. Bei Wasser zeigt sich ein anderes Verhalten. Für $T < 32^\circ\text{C}$ sinkt die Viskosität unter zunehmendem Druck, da die Wasserstoffbrücken zerstört werden [36].

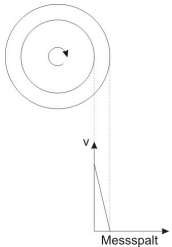
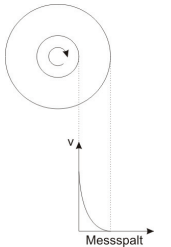
DIN-System	Relativ-System
Standardgeometrie	eigene Geometrie
enger Messspalt	weiter Messspalt
lineare Abhängigkeit	nicht-lineare Abhängigkeit
 Direktmessung	 Relativmessung
Berechnung der Viskosität über Standardformel	Berechnung der Viskosität über Kalibrierkonstante

Tabelle 2.5.: Vergleich von DIN- und Relativ-Messsystem

Konzentrische Zylinder-Messsysteme An dieser Stelle wird genauer auf das in dieser Arbeit verwendete Messsystem eingegangen. Konzentrische Zylinder-Messsysteme bestehen immer aus einem Messkörper (innerer Zylinder) und einem Messbecher (äußerer Zylinder). Messkörper und Messbecher haben als gemeinsames Zentrum ihre rotationssymmetrische Achse. Für Zylinder-Messsysteme gibt es zwei Normen: ISO 3219 und DIN 53019. Beide Normen beruhen auf einem engen Spalt zwischen Messkörper und Messbecher. Generell gibt es zwei grundlegende Systemunterschiede zwischen engem und weitem Spalt. Beim engen Spalt werden die beiden Zylinder als eben angesehen, die Rundung wird vernachlässigt. Somit lassen sich die Definitionen der rheologischen Standardparameter (vgl. Zwei-Platten-Modell auf Seite 22) anwenden. Innerhalb des Messspaltes gibt es eine lineare Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Eine direkte Messung und damit Berechnung der Viskosität ist möglich. Beim weiten Spalt funktioniert dies nicht ohne weiteres. Es kann zu Sekundärströmen, Fließinstabilitäten oder turbulentem Fließverhalten innerhalb des Spalts kommen. Es gibt keine lineare Abhängigkeit und somit ist nur eine Relativmessung möglich. Bei Messsystemen mit weitem Messspalt ist daher zwingend eine Kalibrierung des Messsystems vor der Nutzung nötig, um die Viskosität direkt bestimmen zu können. Der weite Spalt hat dennoch einen entscheidenden Vorteil: Die

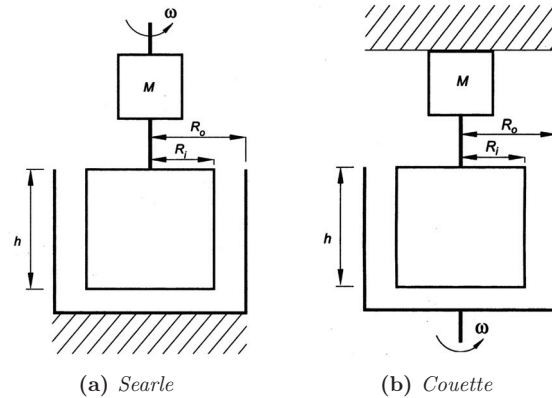


Abbildung 2.14.: Darstellung von Searle- und Couette-Methode

Unwucht des Messkörpers spielt hier nur eine untergeordnete Rolle und kann vernachlässigt werden [37]. Tabelle 2.5 zeigt die beiden Systeme im direkten Vergleich.

Bei konzentrischen Zylinder-Messsystemen werden zwei Betriebsarten unterschieden:

- Searle-Methode (2.14a): Bei dieser Methode wird der Messkörper angetrieben. Der Messbecher steht still. Fast alle Industrielabore arbeiten nach dieser Methode. Sie ist nach G. F. C. Searle benannt. Erste Experimente nach dieser Methode wurden durch C. A. Coulomb 1784 durchgeführt. Ihr Nachteil ist, dass niederviskose Flüssigkeiten bei hohen Drehzahlen Turbulenzen (Taylor-Wirbel) ausbilden [39].
- Couette-Methode (2.14b): Bei dieser Methode steht der Messkörper still. Der Messbecher wird angetrieben. Die Methode ist nach M. Couette benannt. Der Vorteil, dass sich keine Taylor-Wirbel ausbilden, überwiegt nicht gegenüber dem Nachteil der komplizierten Implementierung in den Messstand. Aus diesem Grund wird die Couette-Methode nur sehr selten verwendet [39].

Das in dieser Arbeit aufgebaute Viskosimeter arbeitet nach der Searle-Methode. Eine Heizkonstruktion um einen feststehenden Außenzylinder ist deutlich einfacher zu realisieren. Auch können bei dieser Methode der Antrieb und die Messung des Drehmoments in einem Gerät vereint werden.

Berechnung der Viskosität in einem konzentrischen Zylindermesssystem Im Folgenden soll gezeigt werden, wie sich die Viskosität in einem konzentrischen Zylinder-Messsystem berechnen lässt. Die durchgeführten Rechnungen gelten für Systeme mit weitem Spalt.

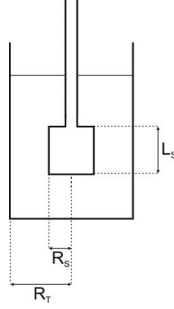


Abbildung 2.15.: Geometrie des Zylinder-Messsystems

Das Messsystem besteht aus einem Messbecher mit dem Radius R_T und einem Messkörper mit dem Radius R_S und der Höhe L_S . Die Geometrie des Systems ist in Abbildung 2.15 dargestellt. Der Teil der Spindel, der neben dem Messkörper ebenfalls im Fluid ist, wird bei den Rechnungen vernachlässigt. Weitere Informationen zur Vorgehensweise finden sich in Metzgers Rheologie Handbuch [36].

Allgemein gilt für die Schubspannung $\tau(r) = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot r^2}$, wobei M das Drehmoment, L die Länge des zylindrischen Messkörperteils und r die Position im Scherspalt, an der die Schubspannung τ herrscht, ist. Bei Bezug der Schubspannung τ_S auf die Oberfläche des Messkörpers ergibt sich

$$\tau_S = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot R_S^2} \quad (2.17)$$

Für die Scherrate an der Position r gilt allgemein $\dot{\gamma}(r) = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{2 \cdot R_S^2 \cdot R_T^2}{R_T^2 - R_S^2} \cdot \omega$ mit $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$, wobei n die Drehzahl des Messkörpers ist. Für die Scherrate $\dot{\gamma}_S$ auf der Oberfläche des Messkörpers ergibt sich

$$\dot{\gamma}_S = \frac{2 \cdot R_T^2}{R_T^2 - R_S^2} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (2.18)$$

Die Viskosität η lässt sich jetzt wieder über die bekannte Formel $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ bestimmen. Es ergibt

sich folgender Zusammenhang:

$$\eta = \frac{15 \cdot (R_T^2 - R_S^2)}{2 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_T^2 \cdot R_S^2} \cdot \frac{M}{n} \quad (2.19)$$

Bis auf das Drehmoment M und die Drehzahl n enthält dieser Ausdruck nur Konstanten, die sich aus der Geometrie des Zylinder-Messsystems ergeben. Vereinfacht lässt sich auch

$$\eta = k \cdot \frac{M}{n} \quad \text{mit} \quad k = \frac{15 \cdot (R_T^2 - R_S^2)}{2 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_T^2 \cdot R_S^2} \quad (2.20)$$

schreiben. In der logarithmischen Darstellung ergibt sich entsprechend:

$$\ln(\eta) = \ln\left(k \cdot \frac{M}{n}\right) = \ln(k) + \ln(M) - \ln(n) \quad \text{mit} \quad k = \frac{15 \cdot (R_T^2 - R_S^2)}{2 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_T^2 \cdot R_S^2} \quad (2.21)$$

Die Viskosität $\ln(\eta)$ hängt also bis auf eine Geometriekonstante k nur von der Drehzahl n des Zylinder-Messsystems und des dafür aufgewendeten Drehmoments M ab.

2.3. Viskositäten von Schlacken

2.3.1. Grundlagen

Formale Beschreibung der Schlackenviskosität Die meisten basischen Schlacken lassen sich bei hohen Temperaturen über einen großen Temperatur-, Druck- und Schergradientenbereich als newtonsche Flüssigkeit beschreiben. Die Viskosität hängt dann allein von der Temperatur, dem Druck und der Schlackezusammensetzung ab. Da der Druck im Vergleich zur Temperatur eine deutlich geringere Rolle spielt, lässt sich im Idealfall der Zusammenhang zwischen der Schlackenviskosität und der Temperatur durch eine Arrhenius-Gleichung beschreiben [38]:

$$\ln(\eta) = \ln(\eta_A) + \frac{E_A}{R \cdot T} \quad (2.22)$$

wobei $\ln(\eta_A) = \ln(\eta_A[\text{Pas}])$ eine Materialkonstante der Viskosität nach Arrhenius, $E_A = E_A[\frac{\text{J}}{\text{mol}}]$ die Aktivierungsenergie für viskoses Fließen nach Arrhenius, $R = 8,3144 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ die allgemeine Gaskonstante und $T = T[\text{K}]$ die Temperatur darstellen.

Da sich in realen Schlacken komplexe Zusammenhänge ergeben, hat Weymann eine Beschreibung mit einer linearen Temperaturabhängigkeit eingeführt [38]:

$$\ln(\eta) = \ln(\eta_W) + \ln(T) + \frac{E_W}{R \cdot T} \quad (2.23)$$

wobei $\ln(\eta_W) = \ln(\eta_W[\text{Pas}])$ eine Materialkonstante der Viskosität nach Weymann, $E_W = E_W[\frac{\text{J}}{\text{mol}}]$ die Aktivierungsenergie für viskoses Fließen nach Weymann, $R = 8,3144 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ die allgemeine Gaskonstante und $T = T[\text{K}]$ die Temperatur darstellen.

Treten in einer Schlacke weitere Phasen auf, was sich bei Strukturänderungen durch z.B. Entmischung oder Kristallisation ergeben kann, so zeigt die Schlacke kein newtonsches Verhalten mehr. Einstein hat 1906 das Mischen von kleinen festen Kugeln in einer Flüssigkeit beschrieben. Für die Viskosität mehrphasiger Systeme leitet sich damit folgende Gleichung ab [40]:

$$\ln(\eta) = \ln(\eta_S) + \ln(1 + 2,5 \cdot \varphi) \quad (2.24)$$

mit der Viskosität $\ln(\eta_S) = \ln(\eta_S[\text{Pas}])$ der Restschmelze ohne Festkörper und dem Feststoff-Volumen-Gehalt $\varphi = \varphi[\%]$.

Diese Gleichung von Einstein beschreibt das Verhalten der Viskosität für kleine Feststoff-Volumengehalte $\varphi < 1 \%$. Für größere Volumengehalte hat Guth die Gleichung erweitert [41]:

$$\ln(\eta) = \ln(\eta_S) + \ln(1 + 2,5 \cdot \varphi + 14,1 \cdot \varphi^2) \quad (2.25)$$

Zu dieser Zeit wurden noch weitere Beschreibung der Viskosität in Mehrphasensystemen veröffentlicht. Alle diese Formeln basieren jedoch auf der Grundidee von Albert Einstein:

$$\ln(\eta) = \ln(\eta_S) + \ln((1 - 1,35 \cdot \varphi)^{-2,5}) \quad \text{nach Roscoe [42]} \quad (2.26)$$

$$\ln(\eta) = \ln(\eta_S) + \ln((1 - \varphi)^{-2,5}) \quad \text{nach Brinkman [43]} \quad (2.27)$$

$$\ln(\eta) = \ln(\eta_S) + \ln(1 + 5,5 \cdot \varphi \cdot \varepsilon) \quad \text{nach Happel [44]} \quad (2.28)$$

$$\text{mit } \varepsilon = \frac{4 \cdot \varphi^{2,3} + 10 - 7,64 \cdot \varphi^{0,67}}{10 \cdot (1 - \varphi^{3,33}) - 25 \cdot \varphi \cdot (1 - \varphi^{1,33})}$$

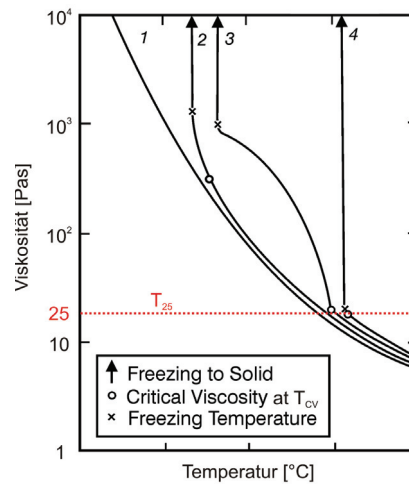


Abbildung 2.16.: Temperaturabhängigkeit der Viskosität bei glasartigen (1), glasähnlichen (2), plastischen (3) und kristallinen (4) Schlacken [20]

Fließeigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur Kenntnisse über die Temperaturabhängigkeit von Schlacken sind überall da von Bedeutung, wo die Fließfähigkeit der Schlacke eine wichtige Rolle spielt. Mit steigender Temperatur nimmt die Schlackenviskosität ab, d.h. die Schlacke wird dünnflüssiger. Bei den Fließeigenschaften werden vier Schlackentypen unterschieden: glasartige, glasähnliche, plastische und kristalline Schlacken. Abbildung 2.16 zeigt die Temperaturabhängigkeit dieser unterschiedlichen Schlackentypen [20]. In dieser Abbildung finden sich zwei Temperaturpunkte, die bei der Kohlevergasung eine wichtige Rolle spielen, die Temperatur T_{25} und die kritische Temperatur T_{CV} . Wird eine Schlacke langsam von hohen Temperaturen herunter gekühlt, so beginnt die Schmelze ab einer bestimmten Temperatur zu kristallisieren. Die sich so bildenden festen Bestandteile haben einen entscheidenden Einfluss auf die Viskosität der Schlacke [45]. Diese Temperatur ist von der Schlackezusammensetzung abhängig. Die Viskosität, die eine Schlacke bei dieser Phasenumwandlung hat, wird kritische Viskosität η_{CV} genannt und die entsprechende Temperatur mit T_{CV} bezeichnet. Bei der Temperatur T_{25} hat die Schlacke eine Viskosität von 25 Pas ($\ln(\eta) = 3,22$). Bei dieser Temperatur ist die Schlacke noch so flüssig, dass sie gut von der Kesselwand eines Kraftwerks abfließen kann. Dieser Punkt ist also insbesondere in der Praxis wichtig, da die Vergasung von Kohle im Allgemeinen bei Temperaturen $> T_{25}$ stattfinden sollte.

Kurve (1) in Abbildung 2.16 zeigt das Verhalten eines typischen Glases. Es gibt keine kriti-

sche Temperatur. Die Viskosität der Schlacke nimmt mit sinkender Temperatur sehr langsam zu. Solch ein Verhalten lässt sich mit der Arrhenius-Gleichung 2.22 beschreiben. Kurve (2) zeigt eine glasähnliche Schlacke. Hier liegt die Temperatur T_{CV} deutlich unter der Temperatur T_{25} . Schlacken mit diesem Verhalten sind in der technischen Anwendung sehr einfach zu beherrschen. Liegt die Anwendungstemperatur über T_{25} , fließt die Schlacke gut ab. Kleine Temperaturänderungen führen auch nur zu einer kleinen Änderung der Viskosität. Kurve (3) zeigt eine plastische Schlacke mit einer langen Kristallisationsphase. Die drei Zustände flüssig, fest-flüssig und fest lassen sich eindeutig identifizieren. Beim Punkt T_{CV} beginnt die plastische Schlacke zu kristallisieren. Es bildet sich eine flüssig-feste Mischphase. Zu Beginn einer Temperaturverringerung steigt die Viskosität steil an. Mit fortschreitendem Kristallisationsgrad schwächt sich dieser Anstieg ab. Schließlich ist die gesamte Schlacke fest und die Viskosität erreicht sprunghaft einen „unendlichen“ Wert. Die kristalline Schlacke von Kurve (4) hat eine nahezu unendlich kurze Kristallisationsphase. Die Mischphase flüssig-fest ist kaum vorhanden. Wird bei der Abkühlung die kritische Temperatur T_{CV} unterschritten, geht die Schlacke sofort in den festen Zustand über und die Viskosität steigt entsprechend ins „Unendliche“. Bei den plastischen und kristallinen Schlacken liegt die Temperatur T_{CV} sehr nah oder sogar unter der Temperatur T_{25} . Eine minimale Änderung der Schlackenzusammensetzung oder der Vergasungstemperatur führt bei diesen Schlacken zu einer signifikanten Viskositätsänderung. Des Weiteren kann es schwer sein, die sich einmal gebildeten Kristalle auch durch eine Erhöhung der Vergasungstemperatur erneut aufzuschmelzen. Dies macht diese Schlacken in der technischen Anwendung deutlich schwerer händelbar [20].

Die Viskosität einer Schlacke hängt neben der Temperatur sehr stark von ihrer Zusammensetzung ab. Insbesondere die sauren Bestandteile SiO_2 und Al_2O_3 sowie die basischen Komponenten Fe_2O_3 , CaO und MgO haben einen großen Einfluss und aus ihren Mengenanteilen lässt sich direkt auf den Schlackentyp schließen. Schlacken mit einem $(Fe_2O_3+CaO+MgO)$ -Anteil von weniger als 30 % und einem Al_2O_3 -Anteil < 24 % sind meistens glasartig. Liegt der Al_2O_3 -Anteil zwischen 24 und 30 %, ist die Schlacke plastisch. Liegt der $(Fe_2O_3+CaO+MgO)$ - oder Al_2O_3 -Anteil über 30 %, so handelt es sich wahrscheinlich um eine kristalline Schlacke [46].

2.3.2. Mathematische Modelle

Allgemeine Modelle für newtonsche Flüssigkeiten Newtonsche Flüssigkeiten sind der einfachste Fließtyp. Vollständig geschmolzene Schlacken werden normalerweise als newtonsche

Flüssigkeiten beschrieben, obwohl dies bei sehr hohen Scherraten nicht immer zutreffen muss. Im letzten Jahrhundert wurde eine Vielzahl von Gleichungen entwickelt, die einen Bezug zwischen der Viskosität und der Temperatur eine Schlacke herstellen. Alle diese Formalismen enthalten zusammensetzungsspezifische Konstanten, die vom Benutzer entsprechend angepasst werden müssen [38]. Auch beim Logarithmus ist es egal, ob der natürliche Logarithmus $\ln(\eta)$ oder der dekadische Logarithmus $\lg(\eta)$ verwendet wird. Die berechneten Parameter müssen nur entsprechend angepasst werden. Bei den Grundmodellen wird daher die Schreibweise $\log(\eta)$ verwendet.

Arrhenius (1887): Das Arrhenius Modell wird genauso oft zur Beschreibung von Silikatschmelzen wie auch von anderen Flüssigkeiten verwendet. Es drückt den Zusammenhang zwischen Viskosität und Temperatur über zwei Parameter a und b aus:

$$\log(\eta) = \log(a) + \frac{b}{T} \quad (2.29)$$

a und b sind von der Schlackezusammensetzung abhängige Konstanten und T eine absolute Temperatur. 1986 stellten Richtel et al. experimentell fest, dass die Konstante $b = b(T)$ je nach Zusammensetzung auch von der Temperatur abhängen kann [38].

Vogel-Fulcher-Tammann (1921): Das VFT-Modell wurde unabhängig von Vogel, Fulcher und Tammann entwickelt. Es enthält drei zusammensetzungsspezifische Parameter a, b und c:

$$\log(\eta) = a + \frac{b}{T - c} \quad (2.30)$$

Das Modell eignet sich gut für die Viskositätsberechnung von Silikatschmelzen. Durch den dritten eingeführten Parameter ist eine genauere Vorhersage möglich. Es werden aber auch mehr experimentelle Daten zur Bestimmung der drei Parameter a, b und c benötigt [38].

Weymann (1962): Das Weymann Modell baut wie das Arrhenius Verfahren auf zwei Parametern a und b auf. Zusätzlich enthält es einen weiteren Term für die absolute Temperatur T:

$$\log(\eta) = \log(a) + \log(T) + \frac{b}{T} \quad (2.31)$$

Das Verfahren von Weymann ist auch als Frenkel-Modell bekannt. Auch dieses Modell eignet sich gut für die Viskositätsbestimmung von Silikatschmelzen. Da es auf nur zwei statt wie das VFT-Modell auf drei Parameter setzt, sind weniger Experimente zur Bestimmung von a und b erforderlich. Gleichzeitig ist es aufgrund des zusätzlichen Temperaturterms genauer als das

Modell von Arrhenius [38].

Schlackespezifische Modelle zur Viskositätsberechnung Neben den allgemeinen Modellen, bei denen der Anwender selbst die zusammensetzungsspezifischen Parameter bestimmen muss, gibt es eine Vielzahl von schlackespezifischen Modellen. Sie ermöglichen die Viskositätsberechnung in einfachen Schlackesystemen. Diese Modelle lassen sich folgendem Grundschemata zuordnen [38]:

- Modelle, die auf dem Arrhenius-Verfahren beruhen (Shaw 1972, Watt-Fereday 1963, S² 1944)
- Modelle, die auf dem Weymann-Verfahren beruhen (Kalmanovitch-Frank 1988, Streeter 1984, Urbain 1981, Riboud 1981)
- Modelle, die auf dem Vogel-Fulcher-Tammann-Verfahren beruhen (Lakatos 1972)
- Modelle, die die Viskosität aus der Schlackezusammensetzung berechnen (Bottinga-Weill 1972)
- sonstige Modelle (Sage-McIlroy 1959, Reid-Cohen 1944)

Alle diese Modelle sind das Ergebnis empirischer Auswertungen von Messdaten. Sie setzen alle newtonsches Verhalten innerhalb der Schlacke, also ein vollständig aufgeschmolzenes System, voraus. Zusätzlich lässt sich jedes Modell nur für ganz spezielle Schlackezusammensetzungen verwenden, die von den Entwicklern jeweils mit angegeben werden. Vargas et. al haben 2001 für die Schmelze 62,7 Gew.% SiO₂, 10,6 Gew.% Al₂O₃, 11,7 Gew.% CaO, 8,4 Gew.% MgO, 6,5 Gew.% Na₂O bei 1623 K die Viskosität mit allen Modellen berechnet. Als Referenzwert wurden 32,8 Pas angenommen, die sich aus einem Messwert von Scarfe und Cronin (1986) ergeben. Tabelle 2.6 zeigt diesen Vergleich zwischen Messwert und berechnetem Wert [38]. Je neuer das entwickelte Modell ist, desto genauer stimmen berechneter und gemessener Viskositätswert überein. Im Folgenden wird auf alle Modelle, die 1972 oder später entwickelt wurden, genauer eingegangen und beschrieben, wie sich damit Viskositäten von Schlacken berechnen lassen.

Modell	Jahr	Viskosität in Pas
Messwert	1986	32,81
Reid-Cohen	1944	120
Sage-McIlroy	1959	130
S ²	1963	82
Watt-Fereday	1963	78
Bottinga-Weill	1972	33
Shaw	1972	51
Lakatos	1972	58
Urbain	1981	33
Riboud	1981	18
Streeter	1984	49
Kalmanovitch-Frank	1988	20

Tabelle 2.6.: Messung und Modellrechnung der Viskosität für eine Silikatschlacke bei 1623 K [38]

Bottinga-Weill-Modell (1972) Das Modell von Bottinga und Weill war ursprünglich für magmatische Systeme gedacht. Es beruht auf Daten von synthetischen Systemen. Die Voraussage der Viskosität von flüssigen Silikatschlacken erfolgt über tabellarisch erfasste Konstanten D_i für jeden Schlackebestandteil. D_i variiert für unterschiedliche SiO_2 -Anteile und Temperaturen (Anhang A.2).

$$\lg(\eta) = \sum_i X_i \cdot D_i - 1 \quad (2.32)$$

Die Viskosität wird in Pas angegeben und X_i entspricht dem molaren Anteil der einzelnen Schlackekomponenten, wobei nur Komponenten mit $X_i > 5 \text{ mol\%}$ berücksichtigt werden. Bottinga und Weill nehmen an, dass Al_2O_3 mit anderen Oxiden kombiniert und dabei KAlO_2 , NaAlO_2 , BaAl_2O_4 , SrAl_2O_4 , CaAl_2O_4 , MgAl_2O_4 und MnAl_2O_4 bildet. Die Bildung findet in der hier aufgeführten Reihenfolge statt, bis das gesamte Al_2O_3 verbraucht ist. Fe^{3+} wird in diesem Modell der gleiche Einfluss auf die Viskosität zugeschrieben wie Fe^{2+} , so dass für den Einfluss von Eisenoxid zu FeO konvertiert wird ($X_{\text{FeO}} = X_{\text{FeO}} + 2 \cdot X_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$). Wenn keine Daten für KAlO_2 verfügbar sind, so kann die Annahme $D_{\text{KAlO}_2} = D_{\text{NaAlO}_2}$ gemacht werden. Im Bereich $0,35 < X_{\text{SiO}_2} < 0,45$ existieren keine Daten für D_{NaAlO_2} . Die Autoren empfehlen stattdessen, die D_{NaAlO_2} -Werte aus dem Bereich $0,45 < X_{\text{SiO}_2} < 0,55$ zu verwenden. Sind für D_{TiO_2} keine Werte vorhanden, so gilt die Approximation $D_{\text{TiO}_2} = D_{\text{CaO}}$. Die allgemeine Vorgehensweise beim Bottinga-Weill-Modell lässt sich in folgenden Schritten beschreiben:

1. Neuberechnung der Schlacke-Zusammensetzung unter den vorher genannten Gesichts-

punkten und Berechnung der einzelnen X_i -Werte

2. Bestimmung der dazu passenden D_i -Werte mit Hilfe der Tabellen
3. Berechnung der Viskosität bei zwei benachbarten Temperaturpunkten (Formel 2.32) und anschließende Interpolation

Metalloxid	α_i^0
K ₂ O, Na ₂ O, Li ₂ O	1,2
MgO, FeO	1,5
CaO, TiO ₂	2
„AlO ₂ “	2,9

Tabelle 2.7.: Konstanten zur Berechnung von α im Shaw-Modell

Shaw-Modell (1972) Shaw war der Meinung, dass sich die Viskosität von mehrkomponentigen Silikatschlacken ohne die Verwendung komplizierter Tabellen berechnen lässt. Eine seiner Hauptannahmen ist, dass die $\lg(\eta) \cdot \frac{10^4}{T}$ -Kurve jeder beliebigen Silikatschlacke die entsprechende Kurve von reinem SiO₂ in einem charakteristischen Punkt ($c_T; c_\eta$) = (1,50; -3,78) schneidet. Mit dieser Erkenntnis und beruhend auf der Arrhenius-Gleichung 2.29 entwickelt Shaw folgende Methode zur Berechnung der Viskosität:

$$\lg(\eta) = \alpha \cdot \frac{10^4}{T} - 1,5 \cdot \alpha - 3,78 \quad (2.33)$$

Die Viskosität wird dabei in Pas angegeben, die Temperatur in K und die X_i in mol%. Der Faktor α lässt sich über die Formel

$$\alpha = \frac{X_{SiO_2} \cdot \sum(X_i \cdot \alpha_i^0)}{1 - X_{SiO_2}} \quad (2.34)$$

berechnen, wobei nur die Schlackekomponenten SiO₂, K₂O, Na₂O, Li₂O, MgO, FeO, CaO, TiO₂ und „AlO₂“ berücksichtigt werden. Hierbei gilt $X_{AlO_2} = 2 \cdot X_{Al_2O_3}$ und die einzelnen X_i werden auf $\sum X_i = 1$ normiert. Die Faktoren α_i^0 können der Tabelle 2.7 entnommen werden. Die allgemeine Vorgehensweise beim Shaw-Modell lässt sich in folgenden Schritten beschreiben:

1. Neuberechnung der Schlacke-Zusammensetzung unter den vorher genannten Gesichtspunkten

2. Berechnung von α (Formel 2.34) mit Hilfe der Zusammensetzung und den Faktoren α_i^0 (Tabelle 2.7)
3. Aufstellen der Viskositätsfunktion $\lg(\eta)$, die als Variable nur noch die Temperatur T enthält (Formel 2.33)

Lakatos-Modell (1972) Die Basis für dieses Modell bilden Temperatur-Viskositäts-Messungen von 30 im Labor präparierten Zusammensetzungen des $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O-CaO-MgO}$ -Systems. Grundlage zur Berechnung der Viskosität ist die Vogel-Fulcher-Tamann Gleichung (Gleichung 2.30):

$$\lg(\eta) = a + \frac{b}{T - c} \quad (2.35)$$

Die Temperatur wird in K angegeben und die Faktoren a, b und c lassen sich im Lakatos-Modell folgendermaßen berechnen:

$$\begin{aligned} a &= 1,5183 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 1,6030 \cdot \text{CaO} - 5,4936 \cdot \text{MgO} \\ &\quad + 1,4788 \cdot \text{Na}_2\text{O} - 0,8350 \cdot \text{K}_2\text{O} - 2,4550 \\ b &= 2253,4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 3919,3 \cdot \text{CaO} + 6285,3 \cdot \text{MgO} \\ &\quad - 6039,7 \cdot \text{Na}_2\text{O} - 1439,6 \cdot \text{K}_2\text{O} + 5736,4 \\ c &= 294,4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 544,3 \cdot \text{CaO} - 384,0 \cdot \text{MgO} \\ &\quad - 25,07 \cdot \text{Na}_2\text{O} - 321,0 \cdot \text{K}_2\text{O} + 471,3 \end{aligned} \quad (2.36)$$

Die Symbole Na_2O , K_2O , CaO , MgO und Al_2O_3 stellen dabei die Molfraktion der jeweiligen Komponente bezogen auf SiO_2 dar, also beispielsweise $\text{Na}_2\text{O} = \frac{X_{\text{Na}_2\text{O}}}{X_{\text{SiO}_2}}$. Die allgemeine Vorgehensweise beim Lakatos-Modell lässt sich in folgenden Schritten beschreiben:

1. Konzentrationsneuberechnung der einzelnen Komponenten unter den vorher genannten Gesichtspunkten
2. Berechnung der Konstanten a, b und c (Formel 2.36)
3. Aufstellen der Viskositätsfunktion $\lg(\eta)$, die jetzt nur noch die Variable T enthält (Formel 2.35)

Urbain-Modell (1981) Dieses Modell baut auf der Weymann-Relation (Formel 2.31) auf und war ursprünglich für Keramiken gedacht. Urbain untersuchte hierfür 60 unterschiedliche Zusammensetzungen der ternären Systeme $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MO}$ und $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-M}_2\text{O}$, wobei MO und M_2O die bi- und monovalenten Oxide sind. Das Modell wurde auch für Schlackesysteme getestet und kommt in der Literatur immer wieder für deren Viskositätsberechnungen zum Einsatz. Als erstes werden die Bestandteile der Schlacke den drei Gruppen Netzwurkbildner (g), Netzwurkwandler (m) und Amphotere (a) zugeordnet:

$$\begin{aligned} X_g &= \text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5 \\ X_m &= \text{FeO} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{MnO} + \text{NiO} + 2(\text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2) + 3\text{CaF}_2 \\ X_a &= \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{B}_2\text{O}_3 \end{aligned} \quad (2.37)$$

Die Mengenangaben erfolgen dabei in mol%. Aus den unterschiedlichen X_i lässt sich jetzt der Faktor α bestimmen:

$$\alpha = \frac{X_m}{X_m + X_a} \quad (2.38)$$

Mit Hilfe von α und dem molaren Anteil von SiO_2 an der Schlacke wird der Parameter b berechnet:

$$\begin{aligned} b_0 &= 13,8 + 39,9355 \cdot \alpha - 44,049 \cdot \alpha^2 \\ b_1 &= 30,481 - 117,1505 \cdot \alpha + 129,9978 \cdot \alpha^2 \\ b_2 &= -40,9429 + 234,0486 \cdot \alpha - 300,04 \cdot \alpha^2 \\ b_3 &= 60,7619 - 153,9276 \cdot \alpha + 211,1616 \cdot \alpha^2 \\ b &= b_0 + b_1 \cdot \text{SiO}_2 + b_2 \cdot (\text{SiO}_2)^2 + b_3 \cdot (\text{SiO}_2)^3 \end{aligned} \quad (2.39)$$

Aus diesem Parameter b folgt nun für den Parameter a:

$$-\ln(a) = 0,2693 \cdot b + 13,9751 \quad (2.40)$$

Jetzt lässt sich mit Hilfe der Weymann-Gleichung die Viskosität in Pas in Abhängigkeit von der Temperatur in K berechnen:

$$\ln(\eta) = \ln(a) + \ln(T) + \frac{b \cdot 10^3}{T} \quad (2.41)$$

Die Temperatur kann beim Urbain-Modell nicht frei gewählt werden, sondern es gilt $T \geq T_m$ oder T_1 für stabile Schmelzen und $T > T_g$ für superkalte Schmelzen, wobei T_m , T_1 und

T_g die Schmelz-, Fließ- und Glasübergangstemperatur sind. Zusammenfassend lässt sich die Vorgehensweise beim Urbain-Modell wie folgt beschreiben:

1. Konzentrationsberechnung der in der Zusammensetzung enthaltenen Oxide und Berechnung von X_m , X_a (Formel 2.37)
2. Berechnung der Konstante α (Formel 2.38)
3. Berechnung der Konstante b (Formel 2.39)
4. Berechnung der Konstante a (Formel 2.40)
5. Aufstellen der Viskositätsfunktion $\ln(\eta)$ mit der Variablen T (Formel 2.41)

Riboud-Modell (1981) Bei diesem Modell wurde das Urbain-Modell als Grundlage verwendet, jedoch wurden die einzelnen Konstanten aufgrund von Untersuchungen am System $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaF}_2$ modifiziert:

$$\begin{aligned} \ln(a) = & -35,76 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 1,73 \cdot (\text{FeO} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO}) \\ & + 7,02 \cdot (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) + 5,82 \cdot \text{CaF}_2 - 19,81 \\ b = & 68,833 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 23,896 \cdot (\text{FeO} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO}) \\ & - 39,159 \cdot (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - 46,356 \cdot \text{CaF}_2 + 31,14 \end{aligned} \quad (2.42)$$

Alle Konzentrationen werden als Molenbruch berechnet. Die Viskositätsfunktion ergibt sich wie schon bei Urbain als

$$\ln(\eta) = \ln(a) + \ln(T) + \frac{b \cdot 10^3}{T} \quad (2.43)$$

Die Autoren geben an, dass sich das Riboud-Modell für folgende Schlackezusammensetzungen eignet:

- SiO_2 : 27-56 wt%
- Al_2O_3 : 0-12 wt%
- CaO : 8-46 wt%
- Na_2O : 0-22 wt%

- CaF_2 : 0-18 wt%

Die Vorgehensweise beim Riboud-Modell lässt sich wie folgt beschreiben:

1. Konzentrationsberechnung der in der Zusammensetzung enthaltenen Oxide
2. Berechnung der Konstanten a und b (Formel 2.42)
3. Aufstellen der Viskositätsfunktion $\ln(\eta)$, die nur noch von T als Variable abhängt (Formel 2.43)

Streeter-Modell (1984) Basierend auf der Viskositätsmessung von 17 US Braun- und Steinkohlen mit einem Zusammensetzungsbereich von:

- SiO_2 : 25-70 mol%
- Al_2O_3 : 8-27 mol%
- Fe_2O_3 : 0-9 mol%
- CaO : 8-33 mol%
- MgO : 4-13 mol%
- Na_2 : 0-11 mol%
- kleinere Anteile ($X_i < 5 \text{ mol\%}$): K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , SO_3

haben Streeter, Diehl und Schobert einen Korrekturterm für das Urbain-Modell eingeführt:

$$\ln(\eta) = \ln(a) + \ln(T) + \frac{b \cdot 10^3}{T} - \Delta \quad (2.44)$$

mit

$$\Delta = m \cdot T + c \quad (2.45)$$

Der Wert für Δ hängt vom Silikatgehalt der Schlacke ab und lässt sich nach den folgenden drei Methoden berechnen, wobei die Konzentrationen dem Molenbruch entsprechen:

- High-silica slags ($b > 28$):
 $F = \text{SiO}_2 / (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$
 $10^3 \cdot m = -1,7264 \cdot F + 8,4404$
 $c = -1,7137 \cdot (10^3 \cdot m) + 0,0509$
- Intermediate-silica slags ($24 < b < 28$):
 $F' = b \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$
 $10^3 \cdot m = -1,3101 \cdot F' + 9,9279$
 $c = -2,0356 \cdot (10^3 \cdot m) + 1,1094$
- Low-silica slags ($b < 24$):
 $F'' = \text{CaO} / (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$
 $10^3 \cdot m = -55,3649 \cdot F'' + 37,9186$
 $c = -1,8244 \cdot (10^3 \cdot m) + 0,9416$

Zusammenfassend lässt sich die Vorgehensweise beim Streeter-Modell wie folgt beschreiben:

1. Konzentrationsberechnung der in der Zusammensetzung enthaltenen Oxide und Berechnung von X_m , X_a (Formel 2.37)
2. Berechnung der Konstante α (Formel 2.38)
3. Berechnung der Konstante b (Formel 2.39)
4. Berechnung der Konstante a (Formel 2.40)
5. Berechnung der Werte für F , m und c nach der oben beschriebenen Vorgehensweise
6. Berechnung des Korrekturfaktors Δ (Formel 2.45)
7. Aufstellen der Viskositätsfunktion $\ln(\eta)$ (Formel 2.44)

Kalmanovitch-Frank-Modell (1988) Auch dieses Modell basiert auf dem original Urbain-Modell. Experimentelle Daten von Machin (Gläser des Systems $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$) wurden zur Optimierung verwendet. Für den Zusammenhang zwischen a und b gilt:

$$-\ln(a) = 0,2812 \cdot b + 14,1305 \quad (2.46)$$

Die allgemeine Vorgehensweise zur Erstellung der Viskositätsfunktion lässt sich beim Kalmanovitch-Frank-Modell wie folgt beschreiben:

1. Konzentrationsberechnung der in der Zusammensetzung enthaltenen Oxide und Berechnung von X_m , X_a (Formel 2.37)
2. Berechnung der Konstante α (Formel 2.38)
3. Berechnung der Konstante b (Formel 2.39)
4. Berechnung der Konstante a (Formel 2.46)
5. Aufstellen der Viskositätsfunktion $\ln(\eta)$ (Formel 2.41)

Das Assoziaten-Modell Alle bisher beschriebenen Modelle hängen nur von der Zusammensetzung der Schlacke ab. Die Struktur innerhalb der Schlacke, wie sie die Netzwerktheorie (siehe Kapitel 2.1.2 auf Seite 16) beschreibt, wird dabei nicht berücksichtigt. Die Viskosität von Silikatschmelzen hängt aber sehr stark von der inneren Struktur ab. Dies ist auch der Grund dafür, dass die bisher beschriebenen Modelle nicht über den gesamten Bereich der Zusammensetzung und der Temperatur funktionieren. [47] Die Faktoren dieser Modelle wurden immer für ganz spezielle Schlackentypen berechnet. Das Assoziaten-Modell berücksichtigt die innere Struktur der Schlacke. Ziel ist es, über diese Annahmen ein allgemeingültiges Modell für weite Temperaturbereiche und unterschiedlichste Schlackezusammensetzungen zu entwickeln. Es basiert auf der Annahme, dass die Schlacke aus einem Gemisch von sogenannten Assoziaten besteht. Diese chemischen Spezies mit ihren zugehörigen thermodynamischen Eigenschaften werden dazu verwendet, die nichtidealen Mischungsbedingungen zwischen den Konstituenten zu beschreiben. Die Assoziaten $\text{NaAlO}_2(l)$ und $\text{Na}_2\text{Al}_4\text{O}_7(l)$ vermischen sich zusammen mit den Endprodukten $\text{Na}_2\text{O}(l)$ und $\text{Al}_2\text{O}_3(l)$. Sie bilden die flüssigen Phasen im Binärsystem $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$. Diese Assoziaten werden immer dann eingeführt, wenn sich das Phasendiagramm nicht mehr allein mit den Ursprungssubstanzen, in diesem Fall also Na_2O und Al_2O_3 hinreichend gut beschreiben lässt. Die Zusammensetzung der Assoziaten hängt hauptsächlich davon ab, in welcher Region das Phasendiagramm nicht gut berechnet werden kann und daher ein besserer „Fit“ benötigt wird. [48] Es ist darauf zu achten, dass nicht unnötig viele dieser Assoziaten eingeführt werden. Idealerweise handelt es sich bei den Assoziaten um auch real existierende Verbindungen und sie lassen sich stöchiometrisch korrekt aus den Ursprungssubstanzen bilden. [47] Im Fall der Assoziaten des Binärsystems $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ gilt:

$\frac{1}{2}\text{Na}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{NaAlO}_2$. Der Assoziat $\text{Na}_2\text{Al}_4\text{O}_7$ stellt hingegen keine real existierende Verbindung dar. Er ist für eine bessere Beschreibung des Al_2O_3 - Na_2O -Phasendiagramms eingeführt worden.[48]

Der Avramov-Ansatz Der Avramov-Ansatz baut auf der Annahme auf, dass die Bewegung von Struktureinheiten (wie z.B. Assoziaten) ein thermisch aktivierter Sprung-Prozess ist [49], [50]. Für die Viskosität gilt laut Avramov:

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp \left[\left(\frac{\theta}{T} \right)^a \right] \quad (2.47)$$

Diese Beschreibung der Viskosität gilt nur für reine Substanzen, wie beispielsweise SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O oder K_2O . 2003 wendet Avramov sein Grundmodell auf silikatische Schmelzen an [51].

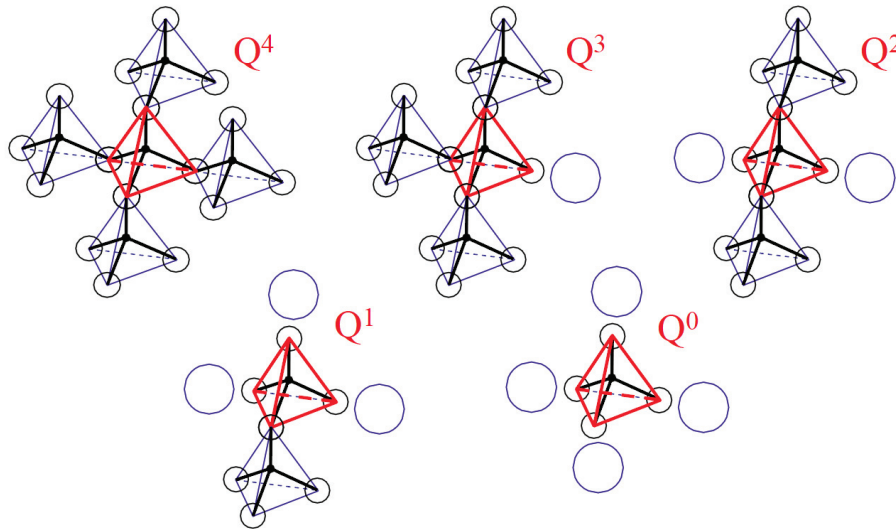


Abbildung 2.17.: Darstellung der Q-Spezies

Dafür ordnet er die Bestandteile der Schlacke fünf unterschiedlichen Gruppen zu, den sogenannten Q-Spezies Q_0 , Q_1 , Q_2 , Q_3 und Q_4 . Diese Q-Spezies entwickeln sich aus der Netzwerktheorie (siehe Seite 16). Die $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Tetraeder bilden große Netzwerke, dabei ist jeder Tetraeder von einer bestimmten Anzahl weiterer Tetraeder umgeben. Maximal kann ein

$(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Tetraeder von vier weiteren $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Tetraedern umgeben sein (Q_4). Abbildung 2.17 zeigt die Struktur der einzelnen Q-Spezies. Im System $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ gibt es beispielsweise vier unterschiedliche Q-Spezies. Bei der Struktureinheit Na_4SiO_4 ist der $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Tetraeder von vier Na^+ Ionen umgeben und von keinem weiteren $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Tetraeder, somit handelt es sich um den Typ Q_0 . Außerdem existieren noch die Q-Spezies Q_2 (Na_2SiO_3), Q_3 ($\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) und Q_4 (Si_2O_4). Mit Hilfe der Q-Spezies lässt sich nach Avramov die Viskosität wie folgt berechnen:

$$\eta = \frac{\eta_0}{\sum_{i=0}^4 Q_n \cdot \exp\left(-\frac{E_n}{R \cdot T}\right)} \quad (2.48)$$

Dabei ist Q_n die Menge der unterschiedlichen Q-Spezies, E_n die Aktivierungsenergie, R die universelle Gaskonstante und T die Temperatur in Kelvin. η_0 ist von der Zusammensetzung und der Temperatur abhängig.

2.3.3. Viskositäten von Modellschlacken

Unter einer Modellschlacke wird eine im Labor durch Präparation hergestellte Schlacke verstanden. Modellschlacken bieten den Vorteil, dass durch gezielte Konzentrationsveränderung eines einzelnen Bestandteils der Einfluss dieser Komponente auf die gesamte Schlacke untersucht werden kann.

Das quaternäre $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ System In der Literatur gibt es hunderte Viskositätswerte zu den verschiedensten Modellschlackesystemen. Ziel ist es, aus den Ergebnissen mit Modellschlacken Rückschlüsse auf reale Kohleschlacken zu ziehen. In dieser Arbeit wird ein Modell zur Viskositätsberechnung im System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ entwickelt. Das quaternäre System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ lässt sich in Untersysteme mit weniger Komponenten unterteilen. Insgesamt liefern die vier unterschiedlichen Komponenten neben dem Gesamtsystem vier Ternärsysteme, sechs Binärsysteme und vier Einzelkomponentensysteme.

Die Glasdatenbank SciGlass SciGlass ist die größte verfügbare Datenbank zu Glaseigenschaften. Sie basiert auf Mazurins „Handbook of Glass Data“ und wurde über die Jahre mit veröffentlichten Messwerten ergänzt. Die Messwerte aus alten Veröffentlichungen wurden hierfür zum Teil händisch aus den Diagrammen abgelesen und in die Datenbank aufgenommen. SciGlas enthält Stoffdaten zu 321316 unterschiedlichen Glaszusammensetzungen (Version 7.2).

Viskositätswerte sind zu 31610 Zusammensetzungen vorhanden.

Literaturrecherche mit SciGlass Die Literaturrecherche mit SciGlass liefert für das quaternäre System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ und seine Untersysteme insgesamt 6048 Viskositätswerte, die sich auf neun Systeme verteilen. Zu den sechs Systemen Na_2O , K_2O , $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ und $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ gibt es keinerlei Viskositätswerte. Die Tabelle in Abbildung 2.18 zeigt eine Übersicht der Rechercheergebnisse. Detaillierte Angaben zu den einzelnen Systemen sind im Anhang A.3 aufgeführt.

Anzahl SciGlas Einträge				Anzahl Messpunkte			
4er System	SiO2	Al2O3	Na2O	K2O	4_1	14	246
3er Systeme	SiO2	Al2O3	Na2O	3_1	42	1045	
	SiO2	Al2O3	K2O	3_2	7	108	
	SiO2	Na2O	K2O	3_3	7	148	
	Al2O3	Na2O	K2O	3_4	-	-	
2er Systeme	SiO2	Al2O3	2_1	9	203		
	SiO2	Na2O	2_2	92	2264		
	SiO2	K2O	2_3	26	590		
	Al2O3	Na2O	2_4	-	-		
	Al2O3	K2O	2_5	-	-		
	Na2O	K2O	2_6	-	-		
1er Systeme	SiO2	1_1	66	1418			
	Al2O3	1_2	4	26			
	Na2O	1_3	-	-			
	K2O	1_4	-	-			

Abbildung 2.18.: Ergebnis der SciGlass Recherche des quaternären Systems $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ und seiner Untersysteme

2.3.4. Viskositäten von natürlichen Schlacken

Zu den natürlichen Schlacken werden alle Schlacken gezählt, die bei der Verbrennung bzw. Vergasung von natürlichen Kohlen entstehen. Weltweit gibt es zahlreiche unterschiedliche

natürliche Kohlen, deren zugehörigen Schlacken eine entsprechend große Vielfalt an Zusammensetzungen aufweisen. Viskositätsuntersuchungen wurden zu einer großen Anzahl dieser Schlacken durchgeführt. SciFinder liefert für die Schlagworte „Coal“, „Slag“ und „Viscosity“ allein 459 unterschiedliche Literaturquellen. Eine systematische und vollständige Vermessung aller realen Schlacken ist aufgrund der Vielzahl natürlicher Kohlen jedoch unmöglich. Da Kohle unter reduzierender Atmosphäre vergast wird, sind Viskositätsmessungen unter diesen Bedingungen für die vorliegende Arbeit von besonderem Interesse. Tabelle 2.8 zeigt eine Übersicht entsprechender Literaturstellen. Detailliertere Angaben über einzelne Kohlesorten sowie gemessene Temperatur- und Viskositätsbereiche finden sich, soweit vorhanden, im Anhang A.4.

2.3.5. Druckabhängigkeit der Viskosität

Bei der Viskosität flüssiger Schlacken ist der Einfluss des Drucks im Vergleich zum Temperatureinfluss sehr gering. Eine Druckänderung von 0,1 MPa auf 30 MPa hat bei einem Fluid in etwa denselben Einfluss wie eine Temperaturänderung um 1 K [36]. Flüssige Schlacken zeigen unter Druck, wie jede andere Flüssigkeit auch, eine sehr schlechte Komprimierbarkeit. Daher spielt der Druck physikalisch kaum eine Rolle beim Viskositätsverhalten. Erst im GPa-Bereich sind überhaupt Änderungen der Viskosität erkennbar und diese fallen verhältnismäßig gering aus. Mori et al. untersuchten 2000 die Viskosität von Albitschmelzen unter hohen Drücken im GPa-Bereich. Er stellte eine Verringerung der Viskosität mit steigendem Druck fest, was er auf die Schwächung der T-O-Bindung (T stellt hierbei das tetraedische Kation wie Al oder Si dar) zurückführt. Der T-O Bindungsabstand verkürzt sich und der Winkel der T-O-T-Bindungen wird vergrößert [71]. Ähnliche Beobachtungen machten auch Kushiro (1976 [72] und 1978 [73]) und Suzuki et al. (2002 [74]). Tinker et al. haben 2004 experimentell gezeigt, dass auch bei Silikatschmelzen die Viskosität mit steigendem Druck abnimmt [75].

Mit dem im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Rotationsviskosimeter können Schlacken bei Drücken von bis zu 20 bar vermessen werden. Diese kleinen Drücke sind nicht ausreichend, um die von Tinker beobachtete Viskositätsverringerung zu untersuchen. Vielmehr soll in dieser Arbeit geklärt werden, welche Einflüsse der Partialdruck der Gasatmosphäre auf die Viskosität hat. Durch einen erhöhten Druck steigen auch die einzelnen Partialdrücke der unterschiedlichen Atmosphärgase. Durch diesen sich ändernden Partialdruck könnte es zu chemischen Veränderungen innerhalb der Schlacke kommen, die eine Änderung der Viskosität zur Folge haben kann. Laut Vartiainen hat beispielsweise der Partialdruck von Sauerstoff bei Eisen-Silikat-Schmelzen einen entscheidenden Einfluss auf die Viskosität [76].

Jahr	Autor	Literatur	Anzahl Kohlen	Herkunft
1984	Quon et al.	[52]	3	Kanada
1984	Streeter et al.	[53]	17	USA
1985	Quon et al.	[54]	8	Kanada
1985	Schobert et al.	[55]	2	USA
1991	Nowok et al.	[56]	3	USA
1995	Nowok	[57]	2	USA
1995	Oh et al.	[58]	4	USA
1996	Brooker et al.	[59]	2	USA
1996	Hurley et al.	[60]	1	USA
1996	Hurst et al.	[61]	1	Australien
1997	Kim et al.	[62]	1	USA
			1	China
1998	Groen et al.	[63]	2	USA
1999	Hurst et al.	[64]	85	Australien
2001	Cho et al.	[65]	2	USA
2005	Folkedahl et al.	[66]	1	unbekannt
2007	Yun et al.	[67]	2	Indonesien
			2	Australien
			2	USA
			1	China
			1	Russland
2008	Matyas et al.	[68], [69]	3	USA
2010	Li et al.	[70]	17	China

Tabelle 2.8.: *Literaturübersicht von Viskositätsmessungen an realen Schlacken unter reduzierenden Bedingungen*

2.3.6. Eingesetzte Viskosimeter zur Bestimmung von Schlackeviskositäten

Zunächst einmal muss zwischen kommerziellen und selbst entwickelten Rotationsviskosimetern unterschieden werden. Nur wenige Firmen bieten Hochtemperatur-Viskosimeter als Standardprodukte an. In Deutschland vertreibt die Firma Bähr-Thermoanalyse GmbH solche Geräte. Abbildung 2.19 zeigt das Hochtemperatur-Viskosimeter VIS 403, welches für Messungen bis zu 1700 °C ausgelegt ist. An vielen wissenschaftlichen Einrichtungen kommen häufig selbst



Abbildung 2.19.: *Kommerzielles Hochtemperatur-Viskosimeter von Bähr-Thermoanalyse GmbH*

entwickelte Messapparaturen zum Einsatz. Hierbei wird meistens auf ein kommerzielles Viskosimeter, welches eigentlich für den Niedrigtemperaturbereich gedacht ist, zurückgegriffen. Um dieses Viskosimeter wird dann der Messstand mit dem Ofen entsprechend passend konstruiert. Deutlich seltener sind Viskosimeter, die sowohl für hohe Temperaturen als auch für Druck ausgelegt sind. Bei den kommerziellen Anbietern findet sich keine Firma, die ein solches Viskosimeter vertreibt. In einigen Forschungseinrichtungen kommt für die Hochtemperatur-Hochdruck-Viskositätsmessung ein Kugelfallviskosimeter zum Einsatz. Ein Hochtemperatur-Hochdruck-Rotationsviskosimeter, wie es im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wurde, ist bisher für derartige Untersuchungen noch nicht ausgelegt worden. Dabei sind in Hinblick auf Messungen, die möglichst genau den realen Vergasungsbedingungen entsprechen sollen, sowohl hohe Temperaturen als auch Drücke notwendig.

3. Entwicklung und Aufbau der Messeinrichtung

3.1. Anforderungen an die Messeinrichtung

Ziel ist es, ein Viskosimeter aufzubauen, mit dem sich Messungen sowohl bei hohen Temperaturen als auch unter hohem Druck durchführen lassen. Ein solcher Messstand bildet die Parameter der Vergasung sehr realistisch im Labormaßstab ab. Die im Rahmen dieser Arbeit aufgebaute Messeinrichtung soll dabei folgende Kriterien erfüllen:

- Temperatur bis zu mindestens 1600 °C
- Druck bis zu 20 bar
- Messungen bei unterschiedlichen Gasatmosphären (oxidierend, reduzierend und unter Schutzgas)

Die Steuerung der gesamten Anlage erfolgt dabei über eine selbst geschriebene Software, die sich sehr einfach ohne Hintergrundwissen auch durch Dritte bedienen lässt. Nach einer kurzen Einarbeitung ist es möglich, entsprechende Messungen durchzuführen.

3.2. Mechanischer Aufbau

Erste Herausforderung ist die Realisierung einer möglichen Messung unter Druck. Für diesen Zweck wird der gesamte Ofen, bestehend aus Heizelementen, Isolierung und Kühlung, in einen Druckbehälter eingebaut. Die Planung und der Aufbau von Druckbehälter und Ofen

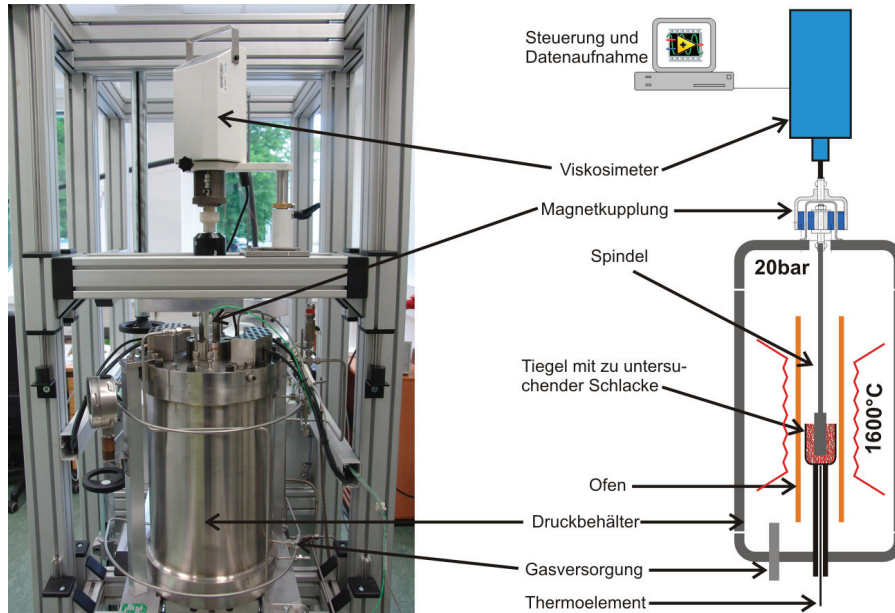


Abbildung 3.1.: Aufbau und schematische Darstellung der Messeinrichtung

wurden von einer externen Firma durchgeführt. Als nächstes muss die Einkopplung des Viskosimeters in den Druckbehälter erfolgen. Um das Drehmoment zu übertragen, kommt eine Magnetkupplung zum Einsatz. Abbildung 3.1 zeigt ein Bild und die schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. In den folgenden Abschnitten wird genauer auf die einzelnen Elemente des Aufbaus und deren Zusammenspiel eingegangen.

3.2.1. Druckbehälter und Ofen

Wie bereits beschrieben, wurde der Druckbehälter mit dem Ofen und der kompletten Steueranlage von externen Firmen gebaut. Der Ofen mit der Steueranlage wurde von der Dipl.-Ing. Hans Prüfer Industrieofenbau GmbH entwickelt. Diese wiederum lies den Druckbehälter bei der Rubotherm Präzisionsmesstechnik GmbH konstruieren und fertigen. Da es solch eine Anlage bisher nicht gab, mussten zahlreiche Anpassungen und Umbauten durchgeführt werden. Immer wieder kam es zu Ausfällen der Heizelemente. Während des Betriebes wurde die Anlage durch die gesammelten Erfahrungen konsequent weiterentwickelt. Auf diese Probleme,

mögliche Ursachen und entsprechende Lösungen wird im Kapitel 3.4 ab Seite 61 genauer eingegangen.

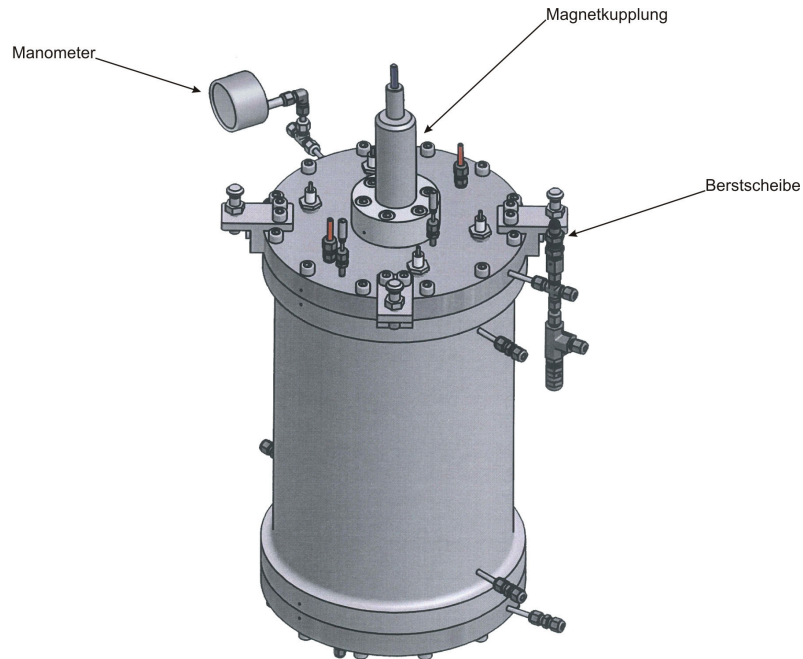


Abbildung 3.2.: *Druckbehälter mit Manometer, Berstscheibe und aufgesetzter Magnetkupplung*

Druckbehälter Der Druckbehälter ist aus 1.4571 Edelstahl gefertigt und wurde aus dem Vol-len gefräst. Er hat einen Innendurchmesser von ca. 23 cm und eine Innenhöhe von ca. 46 cm. Somit ergibt sich ein Innenvolumen von ca. 3,5 Liter. Ausgelegt ist der Druckbehälter für einen Betrieb von bis zu 20 bar. Um während des Betriebes für einen ausreichenden Wärmeabtransport zu sorgen, befindet sich im Deckelflansch ein Kühlwasserein- und -ausgang. Über diese Flanschkuhlung wird verhindert, dass die O-Ringe zur Abdichtung zu heiß werden. Außerdem befinden sich im unteren Bereich am Behältermantel zwei weitere Kühlwassereingänge und im oberen Bereich die entsprechenden Ausgänge. Um die Atmosphäre innerhalb des Druckbehälters zu variieren, befindet sich am Bodenflansch der Gaseingang und am Deckelflansch der Gasausgang. Der Gasausgang ist über eine Berstscheibe abgesichert und mit einem Manometer verbunden. Abbildung 3.2 zeigt den Druckbehälter mit Manometer, Berstscheibe und

3. Entwicklung und Aufbau der Messeinrichtung

aufgesetzter Magnetkupplung.

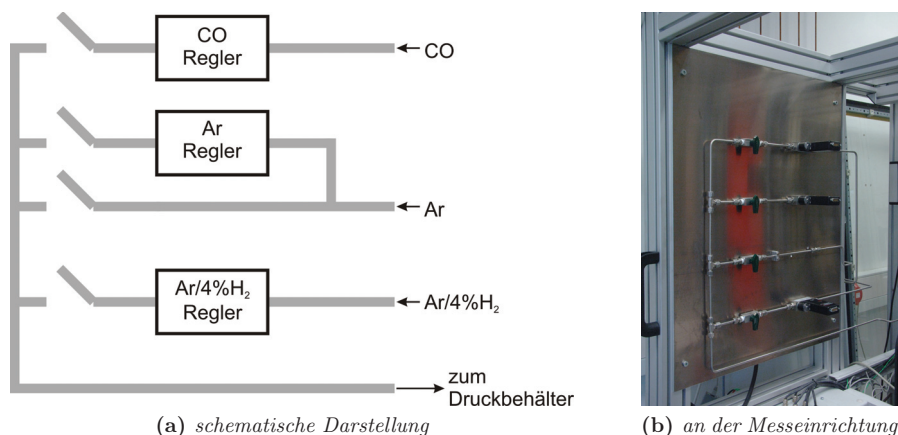


Abbildung 3.3.: Gasversorgung der Messeinrichtung

Gasversorgung und Druckregelung Als Gasregler kommen Massendurchflussregler vom Typ 5850 der Firma Brooks zum Einsatz. Die Druckregelung übernimmt ein Druckregler 5866 von Brooks. Für die Steuerung von Gasflussreglern und Druckregler wird eine WMR4000-Einheit verwendet. Die Regelung des Gasstroms und des Drucks erfolgt dabei manuell. Über eine RS232 Schnittstelle lassen sich die aktuellen Druckdaten auslesen. Mit der WMR4000 lassen sich neben dem Druckregler maximal drei Gasflussregler parallel betreiben. Die Messeinrichtung ist mit einem Regler für Ar, einem Regler für Ar-4%H₂ und einem Regler für CO ausgestattet. Die einsetzbaren Gase wurden dabei nach dem Gesichtspunkt gewählt, unter reduzierender oder inerte Atmosphäre messen zu können. Alle Regler lassen sich aber beliebig gegen Modelle für andere Gase austauschen. Neben der Gaszufuhr über die Regler gibt es eine weitere Leitung, die per Kugelhahn von Hand gesteuert werden kann. Diese ist bei dem Versuchsaufbau mit der Argon-Leitung verbunden. Über diese Leitung kann vor Versuchsbeginn der Druckbehälter gespült werden, um die vorhandene Luft auszutreiben. Die Gasversorgung ist in Abbildung 3.3 zu sehen.

Ofen und Steuereinheit Die eigentliche Heizeinheit ist innerhalb des Druckbehälters aufgebaut. Sie besteht aus drei Kanthal SUPER 1900 Heizelementen und der entsprechenden Isolierung (in Abbildung 3.4 blau dargestellt). Innerhalb des Druckbehälters befinden sich

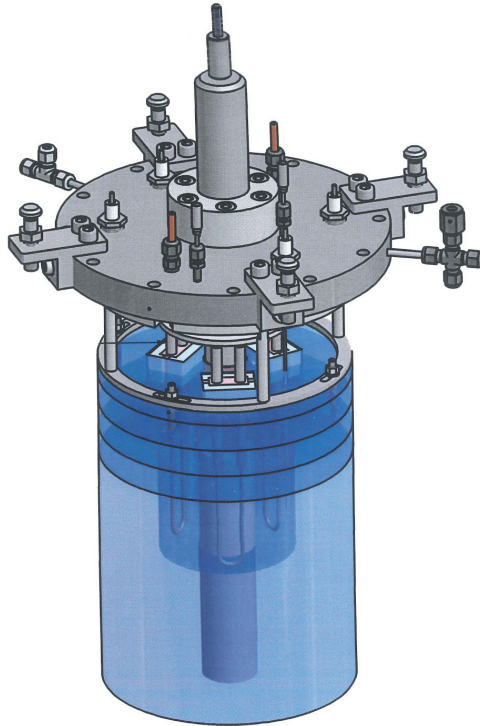


Abbildung 3.4.: *Ofenaufbau innerhalb des Druckbehälters (blau=Isolierung)*

zwei Thermoelemente, um die Temperatur der Heizelemente und die Temperatur der Probe überwachen zu können. Die Probentemperatur wird dabei direkt unter dem Tiegel gemessen. Bei hinreichend langer Wartezeit kann davon ausgegangen werden, dass die Temperatur der Schlacke im Tiegel diesem Wert entspricht. Die Stromversorgung mit passendem Transformator und die Steuereinheit mit zwei Eurotherm Thermoreglern befinden sich im Gestell der Messeinrichtung, so dass der gesamte Versuchsstand mobil ist.

3.2.2. Viskosimeter

Als Viskosimeter kommt ein RC1 Rheometer der Firma RheoTec zum Einsatz (siehe Abbildung 3.5). Hierbei handelt es sich um ein Rotationsviskosimeter, welches sowohl mit Scher-



Abbildung 3.5.: *Rheometer RC1 der Firma RheoTec*

geschwindigkeitsvorgabe (feste Drehzahl) als auch mit Schubspannungsvorgabe (festes Drehmoment) arbeiten kann. Das RC1 weist folgende technische Daten auf:

- Drehmomentbereich: 50 mNm
- Drehmomentauflösung: 0,01 mNm
- Drehzahlbereich: 0,7 bis 800 U/min
- Genauigkeit: $\pm 1\%$ vom Maximalwert

Das bei dieser Messeinrichtung verwendete Gerät wurde seitens RheoTec mit einer Spezial-firmware ausgestattet, die eine Steuerung des Gerätes über die RS232 Schnittstelle mit Hilfe eines Computers erlaubt. Auch können über diese Schnittstelle die aktuelle Drehzahl und das aktuell anliegende Drehmoment ausgelesen werden.

3.2.3. Magnetkupplung

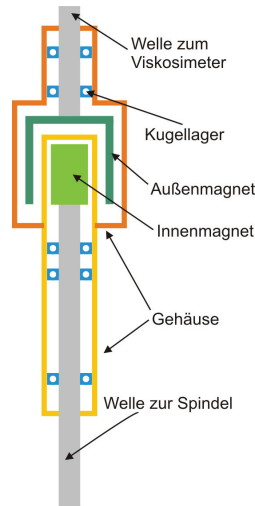


Abbildung 3.6.: Schematischer Aufbau der Magnetkupplung bmd300

Hauptproblem bei dem Versuchsaufbau ist die Einkopplung des vom Viskosimeter zur Verfügung gestellten Drehmoments in den Druckbehälter. Das Viskosimeter kann nur ein maximales Drehmoment von 50 mNm aufbringen. Außerdem muss die Einkopplung ohne möglichen Druckverlust erfolgen. Für eine möglichst reibungsfreie Übertragung ohne Druckverlust bietet sich eine sogenannte Magnetkupplung an. Bei dieser Art von Kupplung findet eine Übertragung von Drehbewegungen mit Hilfe der magnetischen Kraft statt. Hierzu wird außerhalb des Druckbereiches ein Magnet gedreht, dessen magnetisches Feld einen zweiten, innerhalb des Druckbereiches liegenden Magneten antreibt. Der Markt bietet eine Vielzahl unterschiedlicher Magnetkupplungen an. Hier fiel die Entscheidung auf eine bmd300 von Büchi Glas Uster aus der Schweiz. Abbildung 3.6 zeigt den schematischen Aufbau dieser Magnetkupplung. Im gelben Gehäuse mit dem Innenmagneten herrscht dabei der gleiche Druck wie innerhalb des Druckbehälters. Das orangene Außengehäuse steht unter Normaldruck. Der Außenmagnet wird vom Viskosimeter angetrieben und gibt seine Drehbewegung an den Innenmagneten weiter, welcher mit der Spindel des Messsystems verbunden ist. Durch die fünf eingesetzten Kugellager garantiert die bmd300 einen stabilen und ruhigen Lauf der Messspindel innerhalb des Druckbehälters.

3.2.4. Tiegel-Spindel-Messsystem

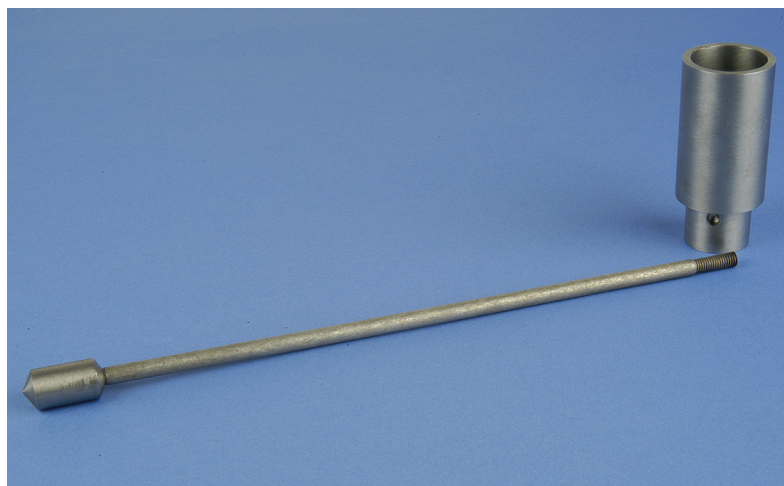


Abbildung 3.7.: Tiegel-Spindel-Messsystem aus Molybdän

Bei Rotationsviskosimetern kommt zur Messung der Viskosität immer ein System aus einem Tiegel, in dem sich die zu untersuchende Probe befindet, und einer Rührspindel zum Einsatz. Für das Tiegel-Spindel-System gibt es die DIN 53019 Norm. Messsysteme nach dieser Norm weisen immer einen sehr engen Messspalt zwischen Spindelkörper und Tiegelwand auf. Schon eine leichte Unwucht der Spindel hätte daher eine fehlerhafte Messung zur Folge. Da durch die Länge der verwendeten Spindel eine leichte Unwucht nicht verhindert werden kann, wird bei dieser Messeinrichtung ein Tiegel-Spindel-System mit „unendlich“ weitem Spalt eingesetzt, bei dem sich die Viskosität über das an der Spindel anliegende Drehmoment bei einer vorgegebenen Drehzahl, wie in Kapitel 2.2.2 genauer beschrieben, bestimmen lässt. Das Design des Rührkörpers orientiert sich mit seiner Form und seinen Maßen (21 mm Höhe, 14 mm Durchmesser, kegelförmige Spitze) an der DIN Norm. Am Ende der Spindel befindet sich ein Gewinde, um die Verbindung zwischen Magnetkupplung und Rührsystem zu realisieren. Da das Rheometer gegen den Uhrzeigersinn dreht, ist dieses Gewinde als Linksgewinde ausgeführt. Der Tiegel weist mit 29 mm einen deutlich größeren Innendurchmesser auf, wodurch der „unendliche“ Messspalt (7,5 mm) zustande kommt. Bei Messungen wird der Tiegel 5 cm mit dem Probenmaterial befüllt, womit sich abzüglich des Spindelvolumens ein Probenvolumen von ca. 29 cm^3 ergibt. Im Anhang A.1 sind die Konstruktionszeichnungen des verwendeten Tiegel-Spindel-Systems zu sehen. Folgende Materialien kommen laut Literatur [38] für solch

ein System in Frage: Molybdän, Wolfram, Eisen, Platin, Platin-Rhodium, Porzellan, Graphit, Al_2O_3 , Platin-Iridium. Die Materialwahl muss an die beim Versuch herrschende Atmosphäre angepasst werden. Molybdän oder Wolfram lassen sich beispielsweise nicht unter oxidierenden Bedingungen einsetzen. Auch muss die Zusammensetzung der zu untersuchenden Probe beachtet werden. Beim Einsatz von Graphit darf die Probe kein Eisenoxid enthalten, da dieses zu elementarem Eisen reduziert wird und ausfällt. In dieser Arbeit wird ausschließlich unter Schutzgas (Ar) oder reduzierenden Bedingungen (Ar-4\%H_2) gemessen, so dass die Wahl auf Molybdän gefallen ist. Molybdän ist verhältnismäßig günstig und eignet sich unter den gewünschten Bedingungen für alle zu messenden Proben. Abbildung 3.7 zeigt das Molybdän-Messsystem. Das kleine Loch im Fuß des Tiegels dient dabei als Arretiermöglichkeit, damit sich der Tiegel nicht mit der Spindel mitdrehen kann und somit das Messergebnis verfälscht wird. Von unten ist der Tiegelfuß außerdem mit einer Bohrung versehen, wodurch das Thermoelement die Temperatur direkt am Tiegelboden misst. Dieser Wert entspricht bei hinreichend langer Wartezeit der Probertemperatur.

3.3. Steuer- und Messsoftware

Die Steuer- und Messsoftware wird in LabVIEW programmiert. Ziel ist die einfache Steuerung des gesamten Versuches und die Möglichkeit der Bedienung auch von Dritten ohne lange Einarbeitungszeit. Durch den Einsatz einer Software ist die Reproduzierbarkeit einzelner Messungen durch einen gleichbleibenden Versuchsablauf gegeben. Außerdem werden durch die automatische Datenaufnahme mit anschließender Teilauswertung menschliche Fehler minimiert.

3.3.1. Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche der Software ist in Abbildung 3.8 zu sehen. Sie teilt sich in zwei Bereiche auf:

- linke Seite: allgemeine Einstellungen
Im Bereich „Porteinstellungen der Messgeräte“ werden die Schnittstellen gewählt, mit denen die einzelnen Messgeräte mit dem Computer verbunden sind. Dieser Bereich der Software muss pro Computer nur einmal eingestellt werden. Im Bereich „Pfad“ gibt der

3. Entwicklung und Aufbau der Messeinrichtung

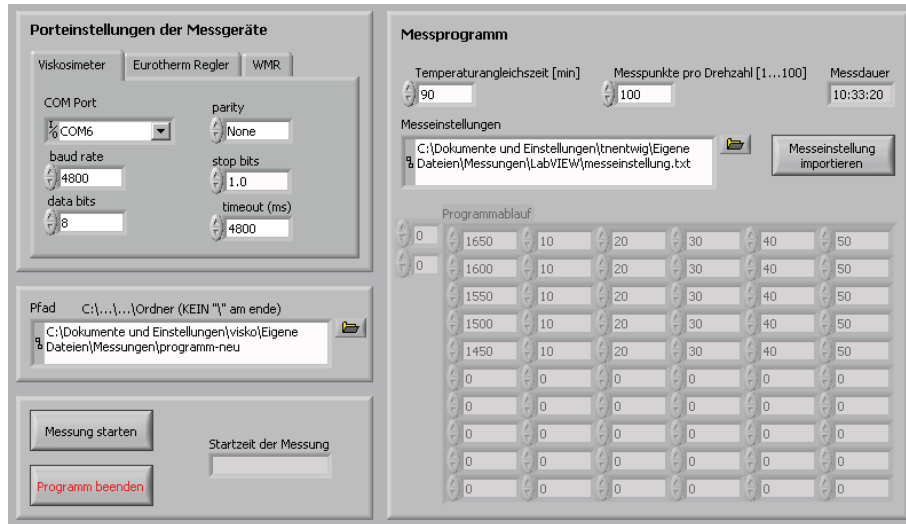


Abbildung 3.8.: Benutzeroberfläche der Steuer- und Messsoftware

Benutzer an, in welchem Ordner die Messdaten gespeichert werden sollen. Außerdem gibt es noch zwei Schaltflächen, um die Messung zu starten und das Programm zu beenden.

- rechte Seite: Einstellungen zum Ablauf der Messung

In diesem Bereich hat der Benutzer die Möglichkeit, den Messablauf aus der Einstellungsdatei zu importieren. Außerdem werden hier die Einstellungen für die Temperaturangleichszeit und die Endtemperatur gewählt. Entsprechend der gewählten Einstellungen wird immer automatisch die insgesamt benötigte Messzeit angegeben.

3.3.2. Funktionsweise der Software

Abbildung 3.9 zeigt den schematischen Ablauf einer Messung. Ziel ist die Messung der Viskosität bei n Temperaturen $T_1 \dots T_n$. Dabei wird jeweils mit fünf unterschiedlichen Drehzahlen $n_1 \dots n_5$ gemessen. Durch die Messung bei mehreren unterschiedlichen Drehzahlen wird erkannt, ob die Probe bei den entsprechenden Temperaturen newtonsches Verhalten zeigt. Insgesamt werden also $5 \cdot n$ Messungen automatisiert durchgeführt. Die zu messenden Temperaturen

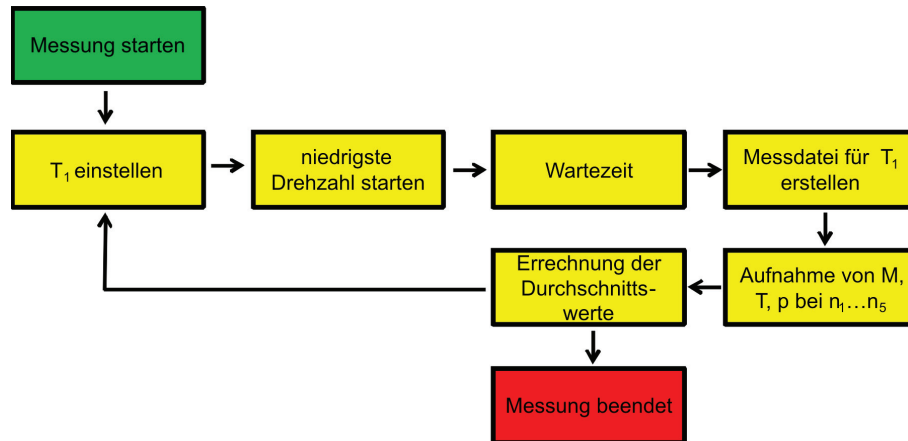


Abbildung 3.9.: Funktionsweise der Software

und Drehzahlen müssen in eine Textdatei eingetragen werden, die dann vom Benutzer in die Software importiert wird. Unterschiedliche Messungen lassen sich so einfach verwalten und es ist gewährleistet, dass die verschiedenen Messreihen immer gleich ablaufen. Zusätzlich müssen noch Angaben über die Temperaturangleichszeit und die Endtemperatur gemacht werden. Jetzt stellt der Benutzer am Eurothermregler eine Temperatur $T_1 + dT$ ein, die über der ersten zu messenden Temperatur T_1 liegt. Ab jetzt läuft die Messung automatisiert nach folgendem Schema ab:

1. Temperatur T_1 wird angefahren
2. Viskosimeter wird mit der niedrigsten Drehzahl n_1 gestartet: Durch das Rühren der Schlacke wird eine gleichmäßige Verteilung der Komponenten innerhalb der Probe gewährleistet
3. Temperatur T_1 wird die eingestellte Temperaturangleichszeit gehalten: Durch die Wartezeit kann sich innerhalb der Probe eine gleichmäßige Temperatur einstellen
4. Messdatei für die Temperatur T_1 wird erstellt: Eine Textdatei $T_1.txt$ wird im vorher gewählten Ordner erstellt
5. Drehmoment M , Temperatur T und Druck p werden bei den unterschiedlichen Drehzah-

3. Entwicklung und Aufbau der Messeinrichtung

len $n_1 \dots n_5$ aufgenommen: Die Software regelt automatisch die Drehzahl und schreibt die Messdaten in die vorher erstellte Messdatei. Pro Drehzahl werden dabei 100 Messwerte hintereinander aufgenommen

- Mittelwerte werden berechnet: Für jede Drehzahl wird automatisch der Mittelwert von M, T und p berechnet und in die Messdatei eingetragen

Diese Schritte werden hintereinander automatisch für die weiteren Temperaturen $T_2 \dots T_n$ durchgeführt. Danach wird durch die Software die vorher eingestellte Endtemperatur angefahren und das Programm beendet.

3.3.3. Auswertung der Messdateien

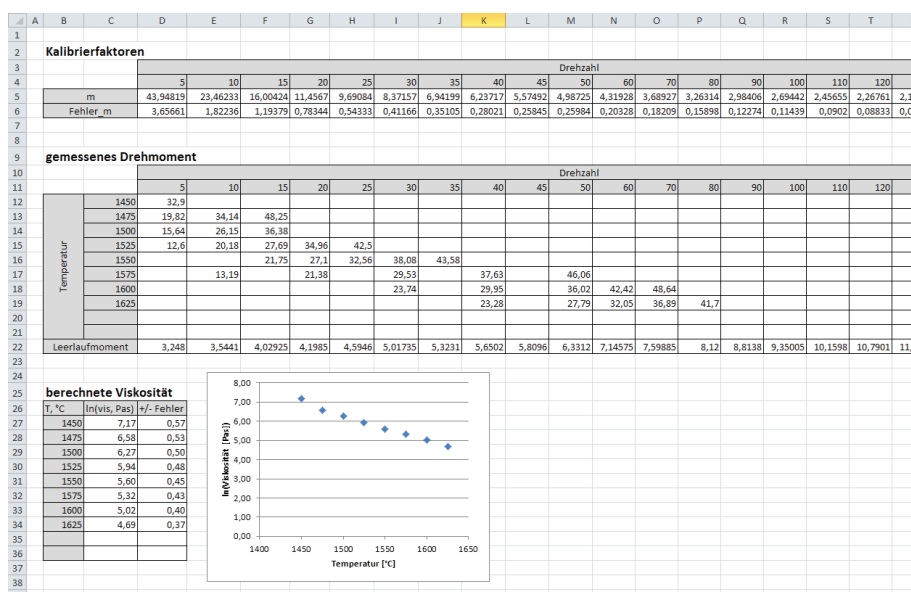


Abbildung 3.10.: Excel-Sheet zur Auswertung der Viskositätsmessungen

Der Benutzer erhält n Messdateien, in denen jeweils bei einer festen Temperatur für fünf unterschiedliche Drehzahlen das gemessene Drehmoment und der gemessene Druck stehen. Die Auswertung der Messungen erfolgt mit Hilfe eines Excel-Sheets, welches in Abbildung 3.10 zu sehen ist. Der Benutzer trägt für die unterschiedlichen Drehzahlen die Kalibrierfaktoren, das

Leerlaufdrehmoment und die gemessenen Drehmomente ein. Außerdem gibt er an, bei welchen Temperaturen die Messungen durchgeführt wurden. Excel berechnet dann über die Formel $\ln(\eta) = \ln(m \cdot M)$ die entsprechenden Viskositäten und bildet automatisch den Mittelwert. Unter dem Punkt „berechnete Viskosität“ findet der Benutzer die Ergebnisse der Messung in tabellarischer Form. Für eine erste Übersicht sind die Werte auch graphisch dargestellt.

3.4. Testmessungen und Weiterentwicklung der Anlage

Die Testmessungen zur Verbesserung der Versuchsanlage wurden mit speziellen Kalibrierölen bekannter Viskositäten durchgeführt. Durch den Einsatz unterschiedlicher Öle stehen auch bei Raumtemperatur unterschiedliche Viskositäten für die Messung zur Verfügung. Dies hat den Vorteil, dass die Anlage nicht immer aufgeheizt werden und bei einem Probenwechsel nicht bis zur Abkühlung gewartet werden muss. Dies führt zu einer deutlichen Zeitersparnis.

3.4.1. Testmessung zur Druckstabilität

Um die Druckstabilität zu testen, wird der Druckbehälter mit Argon gefüllt, so dass ein Druck von etwa 10,5 bar herrscht. Die Gaszufuhr wird geschlossen und der gewünschte Druck wird an der WMR4000 eingestellt. Jetzt wird der aktuelle Druck über fünf Stunden aufgezeichnet. Es werden Drucktests bei 7, 8 und 9 bar durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.11 dargestellt. Zu Beginn sinkt der Druck innerhalb der ersten 30 Minuten linear bis leicht unter den gewählten Soll-Wert. Danach findet ein linearer Anstieg bis zum Soll-Wert statt. Nach etwa einer Stunde ist der Sollwert erreicht. Der Druck schwankt jetzt nur noch leicht und wird mit fortlaufender Zeit stabiler. Für Messungen unter Druck muss beachtet werden, dass die Wartezeit zum ersten Messpunkt etwa eine Stunde betragen sollte. Da die Temperaturangleichszeit auch in diesem Zeitrahmen liegt, stellt dies jedoch keinen zeitlichen Verlust beim Experiment dar.

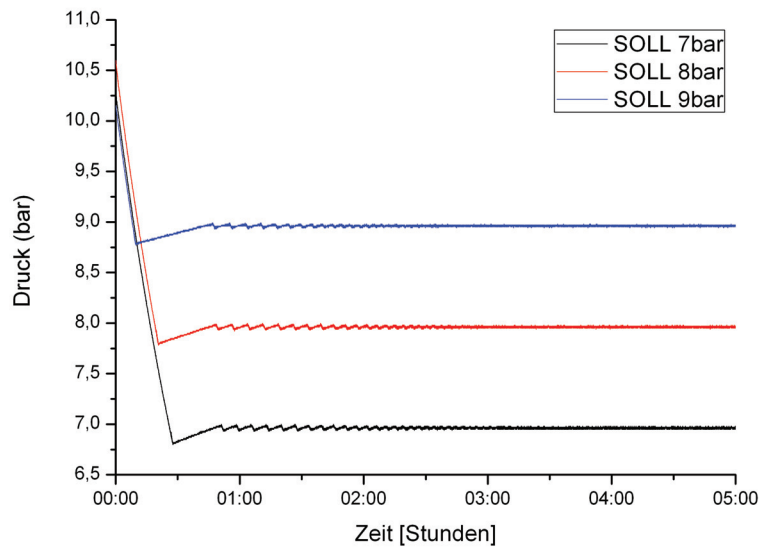


Abbildung 3.11.: Testmessung zur Druckstabilität bei 7, 8 und 9 bar über fünf Stunden

3.4.2. Optimierung der Magnetkupplung

Vortests ohne Probe haben gezeigt, dass die Standardkugellager der Magnetkupplung sehr schwergängig sind. Da das Viskosimeter nur ein maximales Drehmoment von 50 mNm aufbringen kann, ist es sehr wichtig, dass von diesem Drehmoment möglichst wenig durch die Magnetkupplung verloren geht. Standardmäßig sind in der Magnetkupplung fünf geschlossene Kugellager eingebaut. Diese wurden durch vollkeramische Lager ersetzt, welche bei den in den Versuchen verwendeten Drehzahlen absolut wartungsfrei sind. Um den Unterschied zwischen den beiden Lagertypen herauszustellen, wird bei zehn unterschiedlichen Drehzahlen (5...140 U/min) das Drehmoment gemessen, welches das Viskosimeter benötigt, um die Magnetkupplung mit Spindel zu bewegen. Um Fehler zu minimieren, werden für jede Drehzahl 100 Messpunkte aufgenommen, aus denen der Mittelwert für die Drehzahl und das Drehmoment gebildet werden. Als zweiter Test wird mit beiden Lagertypen eine Langzeitmessung durchgeführt. Dabei wird bei 150 U/min das Drehmoment über einen Zeitraum von 27 Stunden aufgezeichnet. Die Keramik-Kugellager haben einige wichtige Vorteile gegenüber den in

der Magnetkupplung verbauten Standard-Kugellagern, wie der Vergleich zwischen beiden Typen zeigt:

Lineares Drehmoment-Drehzahl-Verhalten

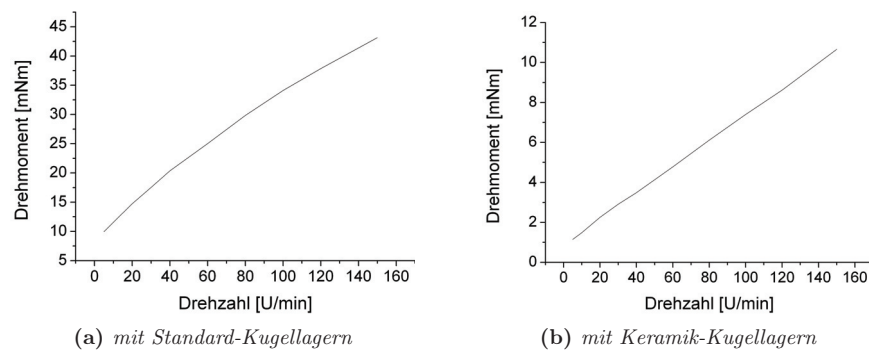


Abbildung 3.12.: Drehmoment-Drehzahl-Verhalten der Magnetkupplung

Abbildung 3.12 zeigt das Drehzahl-Verhalten für die Standard- und die Keramik-Kugellager. Bei den Standard-Kugellagern fällt auf, dass das benötigte Drehmoment nicht linear mit der Drehzahl steigt. Dies könnte mit dem verwendeten Schmierfett bei diesen Lagern zusammen hängen. Durch höhere Drehzahlen entsteht mehr Reibungswärme und das Fett wird weicher, wodurch der Reibungswiderstand sinkt. Die Keramik-Kugellager, die ohne Schmierfett auskommen, zeigen hingegen ein lineares Drehmoment-Drehzahl-Verhalten.

Weniger Reibungsverluste

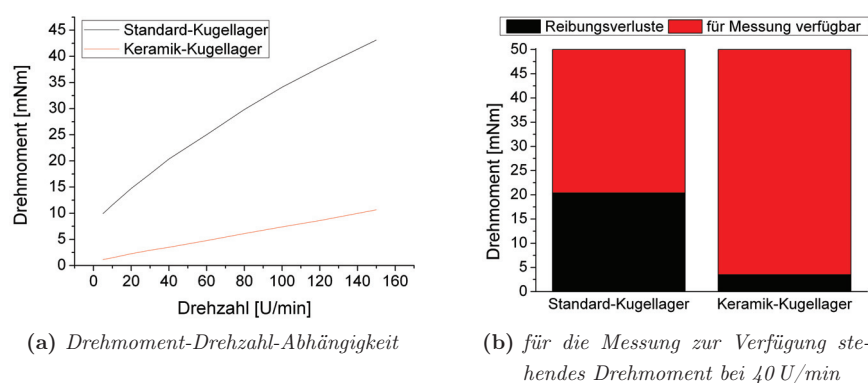


Abbildung 3.13.: Benötigtes Drehmoment von Standard- und Keramik-Kugellagern in Abhängigkeit der Drehzahl

Werden die Werte des benötigten Drehmoments gegenüber der anliegenden Drehzahl aufgetragen, so ist sofort zu erkennen, dass mit den Keramik-Kugellagern deutlich weniger Kraft vom Viskosimeter aufgewendet werden muss (siehe Abbildung 3.13a). Bei 5 U/min benötigt das Viskosimeter bei den Keramik-Kugellagern ca. ein Neuntel der Kraft, die mit Standard-Kugellagern aufgebracht werden muss (1,14 mNm statt 9,93 mNm). Prozentual gesehen nimmt die eingesparte Kraft zwar mit steigender Drehzahl ab, aber selbst bei 140 U/min benötigt das Viskosimeter beim Einsatz der Keramik-Kugellager im Vergleich zu den Standard-Kugellagern nur etwa ein Viertel der Kraft (10,66 mNm statt 43,12 mNm). Da das Viskosimeter insgesamt maximal 50 mNm zur Verfügung stellen kann, ist es wichtig, die Reibungsverluste durch die Magnetkupplung möglichst zu minimieren. Je weniger Drehmoment hier verloren geht, desto mehr Drehmoment steht für die eigentliche Messung zur Verfügung. Abbildung 3.13b zeigt den Drehmomentgewinn bei 40 U/min der Keramik-Kugellager gegenüber den Standard-Kugellagern. Bei den Standard-Kugellagern entfällt fast die Hälfte des Drehmoments auf Reibungsverluste, wohingegen dieser Anteil bei den Keramik-Kugellagern nur noch bei 7 % liegt.

Weniger Rauschen

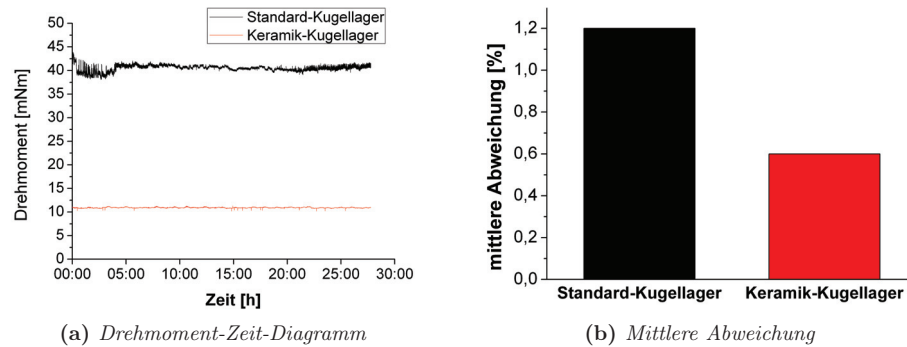


Abbildung 3.14.: Drehmomentschwankung der Magnetkupplung mit Standard- und Keramik-Kugellagern bei 150 U/min

Der letzte Vergleichstest von Standard- und Keramik-Kugellagern betrifft die Langzeitmessung über 27 Stunden. Bei 150 U/min zeigen die Standard-Kugellager ein deutlich größeres Rauschen (siehe Abbildung 3.14a). Die mittlere Abweichung aller Messwerte ist in Abbildung 3.14b dargestellt. Sie fällt mit 1,2 % fast doppelt so groß aus wie bei den Keramik-Kugellagern (0,6 %). Obwohl bei den späteren Versuchen ein Mittelwert aus 100 Messpunkten gebildet wird, ist ein möglichst geringes Rauschverhalten für die Messgenauigkeit von Vorteil.

3.4.3. Optimierung der Isolierung

Die Anschlüsse der Heizelemente dürfen nicht zu heiß werden, weshalb sie gegen den eigentlichen Heizraum isoliert werden müssen. Um ein Durchschlagen der Hitze entlang der Rührspindel in Richtung Heizelementanschluss zu verhindern, befindet sich um die Spindel angeordnet eine fünfstufige Isolierung (siehe Abbildung 3.15). Bei ersten Langzeittestmessungen sind eine Drehmomentschwankung und ein weißer Abrieb aufgefallen. Bei dem Abrieb handelte es sich um Isoliermaterial. Da die Spindeln nicht gerade genug gefertigt sind, führen sie keine exakte Rotationsbewegung aus und ein Schaben an den Isolierteilen 1 und 2 lässt den Abrieb entstehen. Ein weiteres Problem ist der geringe Abstand zwischen Isolierteil 5 und der Probe. Durch die hohe Temperatur und gleichzeitigen Kontakt mit der Schlacke hat sich dieser

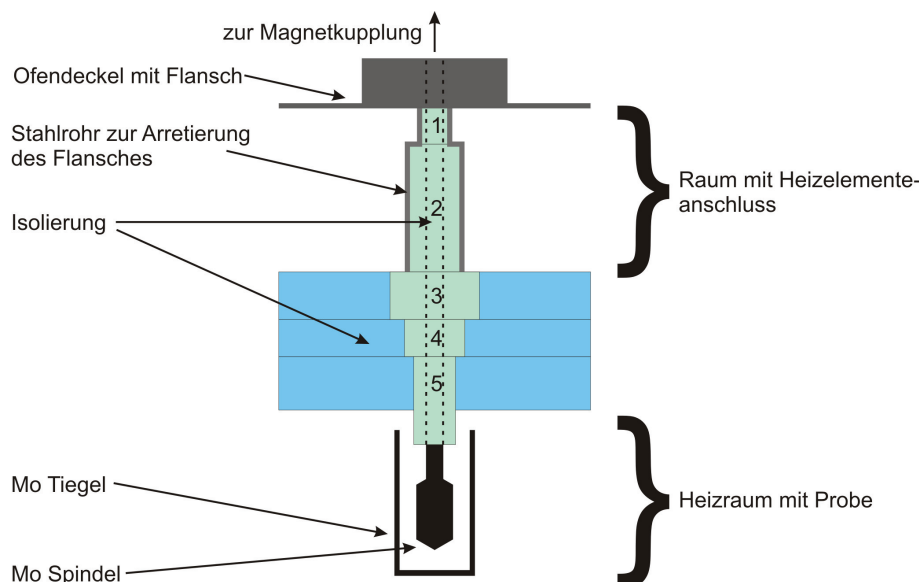


Abbildung 3.15.: Isolation zwischen Heizelementanschlüssen und Heizraum

Isolationsteil bei Testmessungen immer wieder teilweise in der Schlacke aufgelöst. Werden die Isolierteile 1, 2 und 5 entfernt, so sinkt bei 100 U/min das benötigte Grunddrehmoment von etwa 10,5 mNm auf knapp unter 8 mNm. Auch bleibt das Drehmoment selbst über längere Messzeiten konstant. Tests haben gezeigt, dass die so immer noch vorhandene Isolierleistung ausreichend ist.

3.5. Kalibrierung und Testmessung mit realen Gläsern

Für einen ersten realen Test wird die Anlage mit dem Kalk-Soda-Glas G1 der PTB (Physikalisch Technischen Bundesanstalt) aus Braunschweig kalibriert. Um die Kalibrierung zu überprüfen, wird eine Referenzmessung durchgeführt. Hierfür kommt das Standardglas I der DGG (Deutschen Glastechnischen Gesellschaft) zum Einsatz. Anhand der Qualität der Referenzmessung kann schließlich der Fehler des Viskosimeters für zukünftige Messungen abgeschätzt werden.

3.5.1. Kalibrierung mit Kalk-Soda-Glas G1 der PTB

Zunächst wird eine Messung ohne Glas durchgeführt, um das Leerlaufdrehmoment bei den entsprechenden Drehzahlen zu bestimmen. Dieses Leerlaufdrehmoment entsteht durch Reibungsverluste innerhalb der Magnetkupplung und wird bei den späteren Messungen vom Messwert abgezogen, um das tatsächliche Nettomoment zu erhalten. Die Kalibrierung wird im Temperaturbereich 1400 bis 1050 °C mit einer Schrittweite von $\Delta T = 50$ K durchgeführt. Dafür wird das Drehmoment bei den Drehzahlen 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 und 150 U/min gemessen. Für die Kalibrierung werden alle gemessenen Drehmomente > 5 mNm verwendet. Insgesamt erhält man auf diese Weise 20 Drehmoment-Temperatur-Diagramme. Abbildung 3.16 zeigt exemplarisch das Messergebnis für 50 U/min.

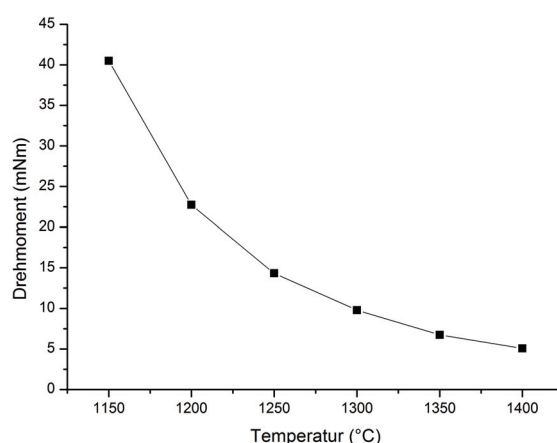


Abbildung 3.16.: Drehmoment-Temperatur-Diagramm von Kalk-Soda-Glas G1 bei 50 U/min

Die Viskosität bei diesen Temperaturen ist bekannt und somit lässt sich das gemessene Drehmoment direkt gegenüber der Viskosität auftragen. Abbildung 3.17 zeigt das entsprechende Drehmoment-Viskositäts-Diagramm.

Das Ziel der Kalibrierung ist die Möglichkeit, später von einem gemessenen Drehmoment auf die Viskosität der untersuchten Probe zu schließen. Entsprechend werden x- und y-Achse getauscht und es ergibt sich das Viskosität-Drehmoment-Diagramm 3.18.

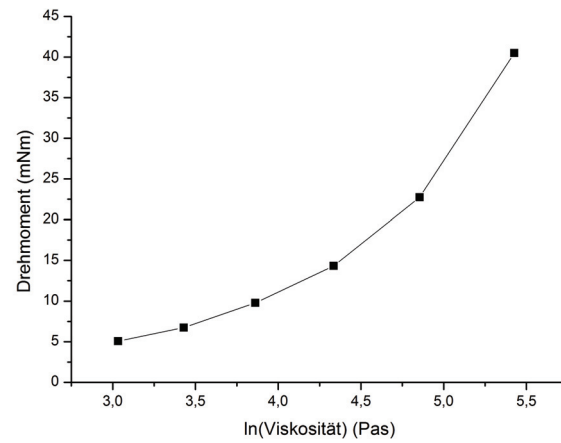


Abbildung 3.17.: Drehmoment-Viskosität-Diagramm von Kalk-Soda-Glas G1 bei 50 U/min

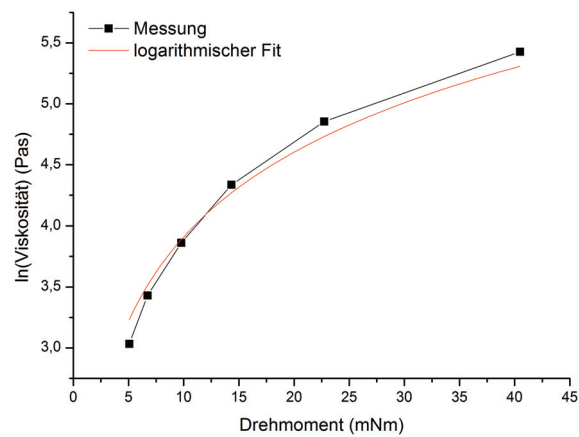


Abbildung 3.18.: Viskosität-Drehmoment-Diagramm von Kalk-Soda-Glas G1 bei 50 U/min mit logarithmischem Fit

Über einen logarithmischen Fit lassen sich für jede Drehzahl die Gerätekonstanten m_n berechnen. Tabelle 3.1 zeigt die auf diese Weise berechneten Konstanten. In der Spalte Fehler ist der Gesamtfehler, welcher sich durch das logarithmische fitten und durch die Geräteungenauigkeit bei der Drehmomentmessung ergibt, aufgeführt.

	Wert	Fehler		Wert	Fehler
m_5	43,94819	$\pm 3,65661$	m_{60}	4,31928	$\pm 0,20328$
m_{10}	23,46233	$\pm 1,82236$	m_{70}	3,68927	$\pm 0,18209$
m_{15}	16,00424	$\pm 1,19379$	m_{80}	3,26314	$\pm 0,15898$
m_{20}	11,45665	$\pm 0,78344$	m_{90}	2,98406	$\pm 0,12274$
m_{25}	9,69084	$\pm 0,54333$	m_{100}	2,69442	$\pm 0,11439$
m_{30}	8,37157	$\pm 0,41166$	m_{110}	2,45655	$\pm 0,09020$
m_{35}	6,94199	$\pm 0,35105$	m_{120}	2,26761	$\pm 0,08833$
m_{40}	6,23717	$\pm 0,28021$	m_{130}	2,11312	$\pm 0,08172$
m_{45}	5,57492	$\pm 0,25845$	m_{140}	1,96926	$\pm 0,07403$
m_{50}	4,98725	$\pm 0,25984$	m_{150}	1,85474	$\pm 0,06166$

Tabelle 3.1.: Gerätekonstanten m_n für unterschiedliche Drehzahlen

Die Viskosität lässt sich dann bei allen zukünftigen Messungen aus dem Drehmoment M_n bei der passenden Drehzahl n über den folgenden Zusammenhang berechnen:

$$\ln(\eta) = \ln(m_n \cdot M_n) \quad (3.1)$$

3.5.2. Referenzmessung mit Standardglas I der DGG

Im Bereich von 1400 bis 1050 °C wird mit einem $\Delta T = 50$ K jeweils bei fünf unterschiedlichen Drehzahlen das Drehmoment gemessen. Mit der Formel 3.1 lässt sich jetzt über die bei der Kalibrierung bestimmten Gerätekonstanten (siehe Tabelle 3.1) die entsprechende Viskosität berechnen. Aus dem für jede Drehzahl berechneten Viskositätswert wird der Mittelwert gebildet. Dieser Wert wird mit dem Viskositätswert aus dem Datenblatt des Standardglases I verglichen. Abbildung 3.19 zeigt die so bestimmte Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur. Zum Vergleich ist im Diagramm auch der Referenzwert laut Datenblatt dargestellt.

Die Viskositätsmessung weicht über den gesamten Messbereich nur leicht von den tatsächlichen Werten ab. Zur besseren Vergleichbarkeit sind in Tabelle 3.2 die Zahlenwerte von ge-

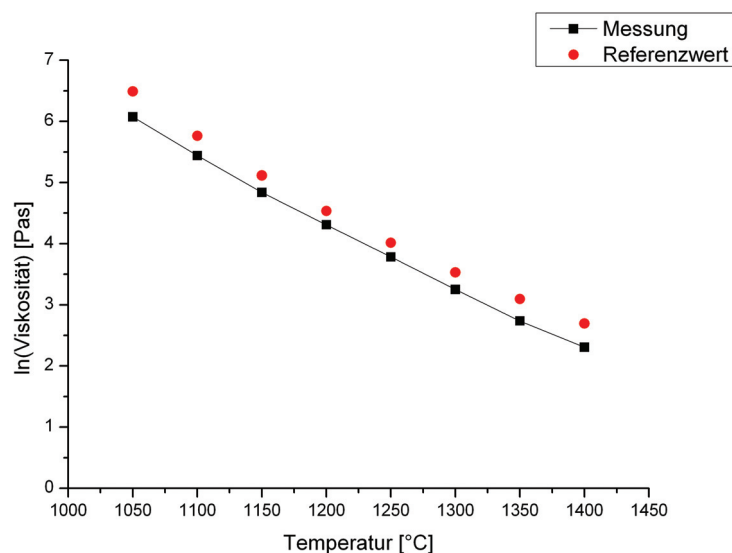


Abbildung 3.19.: Temperatur-Viskositäts-Diagramm der Referenzmessung mit Standardglas I

messener Viskosität und Referenzwert dargestellt. Zusätzlich findet sich in der Tabelle auch die prozentuale Abweichung der gemessenen Werte von den Referenzwerten. Die Abweichung vom Referenzwert liegt für $\ln(\eta) > 3,1$ bei unter 8 %. Erst bei sehr kleinen Viskositätswerten bis runter zu $\ln(\eta) = 2,69$ wird die Abweichung größer. Sie liegt aber immer noch unter 15 %. Der bei den Messwerten angegebene Fehler kommt durch den Fehler bei der Faktorbestimmung und den Gerätefehler bei der Drehmomentmessung zustande.

Temperatur °C	Referenzwert Pas	Messwert Pas	Abweichung %
1050	6,49	6,07 $\pm 0,14$	-6,4
1100	5,76	5,44 $\pm 0,07$	-5,6
1150	5,12	4,84 $\pm 0,07$	-5,4
1200	4,53	4,31 $\pm 0,06$	-5,0
1250	4,02	3,78 $\pm 0,07$	-5,8
1300	3,53	3,25 $\pm 0,09$	-7,9
1350	3,09	2,74 $\pm 0,12$	-11,5
1400	2,69	2,31 $\pm 0,14$	-14,3

Tabelle 3.2.: Referenzmessung und Referenzwerte im Vergleich

3.5.3. Abschätzung der Messgenauigkeit

Der Fehlerbereich bei der Messung der Temperatur kommt durch die Grenzabweichung des Thermoelements zustande. Laut Hersteller liegt die Abweichung für das eingesetzte Typ B Element bei $\pm 0,0025 \cdot T$ (T = Zahlenwert der Temperatur in °C). Der Temperaturunterschied zwischen Probe und Messpunkt kann als kleiner angenommen werden, da sich der Messpunkt direkt im Boden des Probeniegels befindet und zudem vor jeder Messung eine ausreichend lange Zeit für einen Temperaturangleich innerhalb der Probe gegeben ist. Durch das ständige Rühren während der Messung und die ausreichende Höhe der beheizten Zone kann auch die Temperaturverteilung innerhalb der Probe als weitgehend homogen angenommen werden.

Die Messfehler des RheoTec RC1 Viskosimeters liegen beim Drehmoment laut Gerätehersteller bei 1 % des Messwerts. Somit ergibt sich für den Messbereich von 50 mNm ein Fehler von maximal $\pm 0,5$ mNm. Bei der Drehzahl gibt der Hersteller einen Fehler von $\pm 0,02$ U/min an.

Ein weiterer Fehler ergibt sich bei der Berechnung der Gerätekosten m_n . Dieser Fehler lässt sich nicht exakt beziffern.

Außerdem kommt es während der Messung zu Drehmomentschwankungen, die durch Reibungsverluste innerhalb der Magnetkupplung auftreten. Diese werden mit steigendem Drehmoment im Verhältnis immer kleiner. Sie sind der Grund für die größere Abweichung vom Referenzwert bei sehr kleinen Viskositäten. Auch dieser Fehler lässt sich nicht exakt beziffern. Er ist jedoch der größte Fehler und überlagert die anderen Fehler deutlich.

Zusammenfassend kann die Messgenauigkeit für den Versuchsaufbau wie folgt abgeschätzt werden:

- Messfehler der Temperatur in °C:
 $\pm 0,0025 \cdot T$
- Messfehler der Viskosität in Pas:
 $\pm 0,08 \cdot \ln(\eta)$ für $\ln(\eta) > 3,5$
 $\pm 0,15 \cdot \ln(\eta)$ für $\ln(\eta) < 3,5$

Wobei T der gemessenen Temperatur in °C und $\ln(\eta)$ der gemessenen Viskosität in Pas entspricht.

3.6. Diskussion zu weiteren Optimierungsmöglichkeiten der Messeinrichtung

3.6.1. Verbindung des Rheometers mit dem Ofengestell

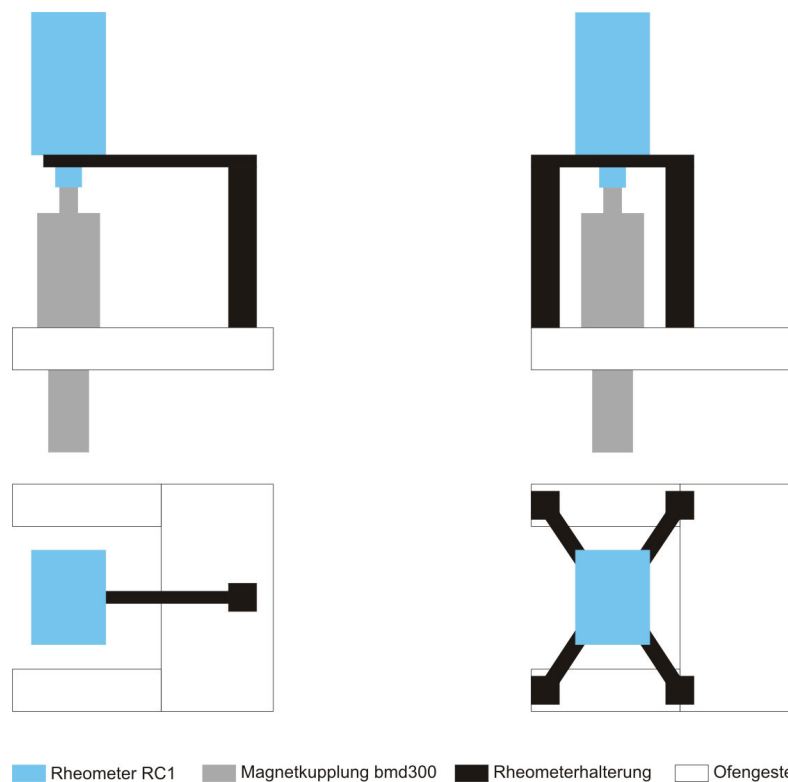


Abbildung 3.20.: *Verbindung des Rheometers mit dem Ofengestell in der Standardausführung (links) und einer möglichen Weiterentwicklung (rechts) in Seitenansicht (oben) und Draufsicht (unten)*

Das Rheometer wird mit der beim Lieferumfang enthaltenen Halterung mit dem Ofengestell verbunden. Diese Halterung ist so konstruiert, dass sich das Rheometer weit von der Auflagefläche der Halterung entfernt befindet. Durch den langen Hebel neigt das Rheometer insbesondere bei hohen Drehzahlen zum Schwingen. Durch eine neue Konstruktion der Hal-

terung wird der Hebelarm verkürzt und die Schwingungen werden verringert. Außerdem wird durch die Verschraubung der Halterung mit dem Ofengestell an vier Punkten die Stabilität erhöht. Der massivere Aufbau führt zu geringeren Messschwankungen und damit zu einer besseren Reproduzierbarkeit und genaueren Messergebnissen. Diese mögliche Verbesserung ist schematisch in Abbildung 3.20 dargestellt.

3.6.2. Designänderungen am Druckbehälter

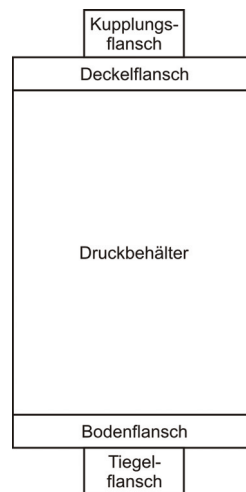


Abbildung 3.21.: Schematische Darstellung von Druckbehälter und Flanschbezeichnungen

Abbildung 3.21 zeigt die Bezeichnungen der einzelnen Komponenten des Druckbehälters. Bei einer Neukonstruktion lassen sich folgende Punkte verbessern:

Druckbehälter Der Druckbehälter wurde aus dem Vollen gefräst. Bei einer Neukonstruktion können erhebliche Kosten gespart werden, wenn für den Druckbehälter ein Stahlrohr in Standardgröße verwendet wird, an dem die Flanschseiten angeschweißt werden.

O-Ring Größen Die O-Ringe an Kupplungsflansch und Tiegel-flansch haben unterschiedliche Größen. Bei einem Redesign ist darauf zu achten, hier die gleiche Größe zu verwenden. So werden weniger unterschiedliche Ersatzteile benötigt.

O-Ring Halterung Tiegelflansch Die Rille, in die der O-Ring für den Tiegelflansch gelegt werden muss, befindet sich auf dem Bodenflansch. Somit muss der O-Ring bei jedem Tiegelswechsel kompliziert neu eingesetzt werden. Hier wäre es sinnvoll, die Rille auf den Tiegelflansch zu setzen.

Strom- und Thermoelementdurchführungen Bei den Stromdurchführungen wird eine Sonderanfertigung von Sitec verwendet. Die Elektroden der Stromdurchführungen bestehen aus Messing. Außerdem sind sie mit einem Durchmesser von nur 4 mm sehr filigran, so dass hier eine Schwachstelle des gesamten Ofensystems liegt. Da es sich um eine Spezialanfertigung handelt, ist die Ersatzteilbeschaffung zeitaufwendig und teuer. Für die Thermoelementdurchführungen kommen modifizierte Verbindungen von Swagelok zum Einsatz, die fest mit dem Druckbehälter verschweißt sind. Durch die Verschweißung verliert der Druckbehälter bei einem Defekt der Durchführungen seine Funktion. Ein Einsatz nach einer Reparatur wäre nur nach erneuter TÜV-Abnahme möglich. Für Strom- und Thermoelementdurchführungen empfehlen sich Produkte von Spectite. Die Stromdurchführungen sind mit Elektrodendurchmessern von bis zu 12,7 mm deutlich stabiler. Durch die Verwendung von Kupfer, welches eine deutlich bessere elektrische Leitfähigkeit aufweist, werden die Elektroden während des Betriebes nicht so heiß. Da es sich um Standardbauteile handelt, sind die Spectite Stromdurchführungen auch deutlich günstiger als die Spezialanfertigungen von Sitec. Die Thermoelementdurchführungen von Spectite werden über ein NPT Gewinde mit dem Druckbehälter verschraubt. Sie sind somit jederzeit austauschbar.

Eingesetzte Thermoelemente Die beiden Thermoelemente zur Überwachung der Heizelementtemperatur und zur Messung der Proben temperatur sind unterschiedlich lang und eine Spezialanfertigung. Bei einem Redesign des Druckbehälters sollte auf gleich lange Thermoelemente in einer Standardlänge zurückgegriffen werden. So werden weniger unterschiedliche Ersatzteile benötigt und durch eine Standardausführung können diese kostengünstiger beschafft werden.

3.6.3. Designänderungen am Ofen innerhalb des Druckbehälters

Durchgängiges Reaktionsrohr Abbildung 3.22 zeigt schematisch die mögliche Neukonstruktion mit einem durchgängigen Reaktionsrohr. Bei der jetzigen Konstruktion schließt das Re-

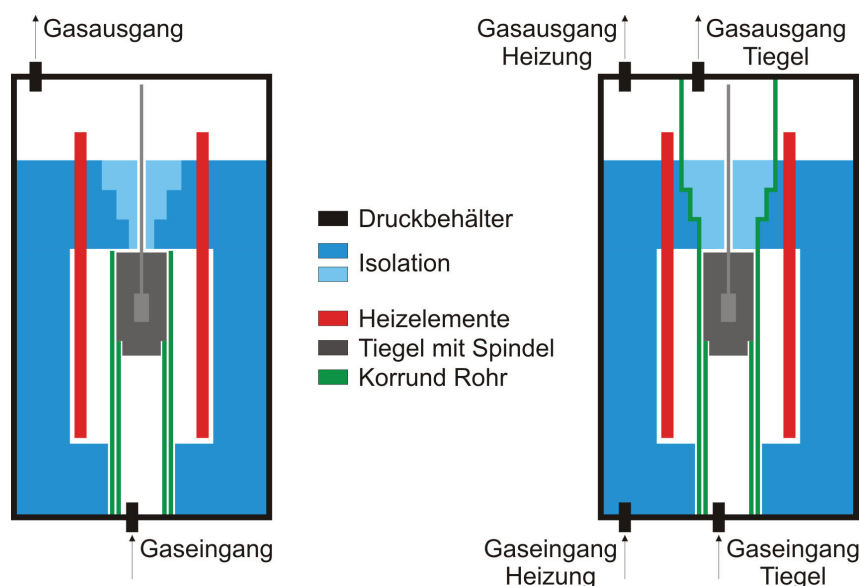


Abbildung 3.22.: Schematische Darstellung des Druckbehälters mit Ofenaufbau im jetzigen Zustand (links) und mit möglichen Verbesserungen (rechts)

aktionsrohr, in dem sich der Tiegel befindet, mit der Tiegeloberkante ab. Bei der Messung freigesetzte Stoffe können sich im gesamten Druckbehälterraum verteilen. Ein gestuftes, durchgehendes Reaktionsrohr würde Heizelement und Tiegel räumlich trennen. Die äußere Isolierung (dunkelblau) wäre so zusätzlich besser vor Verschleiß beim Probenwechsel geschützt. Ein regelmäßiger Austausch ist nur noch für die innere Isolierung (hellblau) nötig.

Gasversorgung Durch das durchgängige Reaktionsrohr und die damit verbundene räumliche Trennung von Heizelementerraum und Probenraum ergeben sich auch bei der Gasversorgung ganz entscheidende Vorteile. Die Heizelemente können unter normaler Luftatmosphäre oder Argon betrieben werden, wohingegen die Atmosphäre im Reaktionsrohr beliebig inert, reduzierend oder oxidierend einstellbar ist. Die Heizelemente verschleifen so deutlich weniger. Auch erreichen sie unter Luft ihre höchste Heizleistung.

Platz für Heizelemente und Heizelementkontaktierung Bei einem neuen Versuchsaufbau sollte darauf geachtet werden, dass der Druckbehälter genügend groß konstruiert wird, so dass

3. Entwicklung und Aufbau der Messeinrichtung

längere Heizelemente eingesetzt werden können. Dadurch ergibt sich mehr Platz zwischen Heizzone und Kontaktierung. Durch zusätzliche Isolationsschichten kann die Temperatur an der Kontaktstelle entsprechend weiter gesenkt werden. Die thermische Belastung im Bereich der Kontaktierung und der damit einhergehende Verschleiß werden deutlich reduziert. Außerdem können bei hinreichend großem Druckbehälter dickere Heizelemente verwendet werden, die deutlich stabiler sind. Die Ausfallsicherheit des gesamten Messstandes wird somit weiter erhöht.

4. Präparations- und Untersuchungsmethoden

4.1. Elementanalyse der Proben

Bei den realen Proben wird nach der Messung eine Atomemissionsspektroalanalyse mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) durchgeführt. „Die ICP-OES macht sich die Eigenschaft der Elemente zunutze, dass Atome aus einem induktiv gekoppelten Plasma Energie aufnehmen können, dabei angeregt werden und unter Abgabe einer charakteristischen Strahlung wieder in ihren Grundzustand zurückfallen. Die Identifizierung dieser Strahlung ermöglicht die qualitative Analyse einer Probe. Die quantitative Bestimmung erfolgt auf der Grundlage der Proportionalität von Strahlungsintensität und Elementkonzentration in Eich- und Analysenproben. Bei der ICP-OES-Analyse wird die flüssige Probe über ein Zerstäubersystem in das induktiv erzeugte Argonplasma eingebracht und angeregt. Das emittierte Spektrum wird in ein Spektrometer übertragen und dort in die einzelnen Wellenlängen zerlegt und ausgewertet. Die Intensitäten der Spektrallinien werden mit CID-Halbleiterdetektoren gemessen. Geeicht wird mit aus Standardlösungen gemischten Multielementlösungen.“ [77] Für Gehalte $> 1\%$ beträgt der relative Fehler $\pm 3\%$, für Gehalte $< 0,1\%$ beträgt er $\pm 20\%$, sonst $\pm 10\%$. Bei den synthetisch hergestellten Laborschlacken wird diese Analyse zusätzlich vor der Messung durchgeführt, um zu sehen, ob die Zusammensetzung der ursprünglich geplanten Präparation entspricht.

4.2. Abschreckversuche

Neben den Viskositätsmessungen werden bei den realen Schlacken auch Abschreckversuche mit anschließender Polarisationsmikroskopie und XRD-Untersuchung durchgeführt. Durch diese

Versuche lassen sich Rückschlüsse auf die amorphen und kristallinen Anteile innerhalb der Schlacke bei unterschiedlichen Temperaturen ziehen. Liegt die Schlacke in vollständig amorpher Phase vor, so zeigt sie newtonsches Verhalten.

4.2.1. Probenpräparation

Für die Abschreckversuche werden die bereits vermessenen Schlacken aus den Viskositätsmessungen verwendet. Die Probe wird grob zerkleinert und in ein Platinröhrchen (Länge: 50 mm, Durchmesser: 10 mm, Dicke: 0,1 mm) gefüllt. Das Röhrchen wird auf beiden Seiten zugepresst.

4.2.2. Versuchsdurchführung

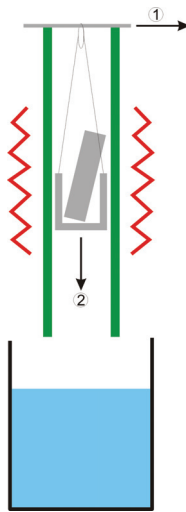


Abbildung 4.1.: Schematische Darstellung des Abschreckversuches

In Abbildung 4.1 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Für die Abschreckversuche kommt ein Ofen mit senkrechtem Reaktionsrohr, dessen beiden Enden offen sind, zum Einsatz. Die Probe wird in einen kleinen Platintiegel gestellt. Dieser ist über einen Platindraht, an dessen Ende sich eine Schlaufe befindet, an einem Platinstab aufgehängt. Die Länge des

Platindrahtes ist so gewählt, dass sich die Probe in der Heizzone des Ofens befindet. Die Probe wird auf eine Temperatur größer ihrer Liquidustemperatur aufgeheizt und dort für etwa eine halbe Stunde gehalten. Nachdem die Probe vollständig aufgeschmolzen ist, wird die Ofentemperatur auf die gewünschte Abschrecktemperatur eingestellt. Nach einer Haltezeit von etwa einer Stunde wird der Platinstab herausgezogen und die Probe fällt zum Abschrecken in ein Wasserbad.

4.2.3. Probenanalyse

Das abgekühlte Platinrohr wird aufgeschnitten und die abgeschreckte Schlacke entnommen. Die Analyse der Probe besteht aus zwei Teilen:

1. Röntgenbeugungsuntersuchung (XRD-Analyse): Die XRD-Analyse wird verwendet, um die Mineralzusammensetzung von feinen Pulverproben qualitativ und semiquantitativ zu bestimmen. Dazu wird die Probe mit einem hochenergetischen monochromatischen Röntgenstrahl bestrahlt, der in einer Röntgenröhre erzeugt wird. An den Netzebenen einzelner Kristallgitter wird der Röntgenstrahl gebrochen. Mit einem Detektor wird ein Halbkreis abgefahren, wobei die einzelnen Röntgenreflexe aufgezeichnet werden. Diese Reflexe können nach der Bragg'schen Beziehung in Gitternetzabstände umgerechnet werden, die für jedes Mineral ganz bestimmte Werte umfassen und eine genaue Mineralbestimmung ermöglichen. [78] Amorphe Bereiche der Probe reagieren nicht. Somit lässt sich mit Hilfe der XRD-Analyse auch der kristalline und amorphe Anteil innerhalb der Probe bestimmen. Außerdem ermöglicht die XRD-Analyse eine Aussage, um welche Mineralien es sich bei den Kristallen handelt.
2. Polarisationsmikroskopie an Dünnschliffen: Die Polarisationsmikroskopie ist eine Standardmethode zur qualitativen und quantitativen Mineral- und Gesteinsbestimmung. Beim Polarisationsmikroskop kommt im Vergleich zum herkömmlichen Lichtmikroskop polarisiertes Licht zum Einsatz. Je nach Mineral und Phase unterscheidet sich die Brechung des polarisierten Lichtes. Manche Minerale absorbieren das Licht auch unterschiedlich stark, je nach dem in welcher Richtung der Kristall durchstrahlt wird. Um Proben polarisationsoptisch untersuchen zu können, muss zunächst ein geeignetes Präparat angefertigt werden. Für die Durchlichtmikroskopie wird die Probe als Dünnschliff präpariert. Hierbei wird die Probe auf einem Glasträger aufgeklebt und anschließend auf 25 bis 30 μm heruntergeschliffen. [79]

4.3. Viskositätsmessungen

4.3.1. Probenpräparation

Die zu untersuchende Probe wird in den Tiegel gefüllt und unter Ar-4 %H₂ aufgeschmolzen. Ist die Probe zu sehr von Luft durchsetzt, muss dieser Vorgang so oft wiederholt werden, bis die gewünschte Füllhöhe erreicht ist. Die Probe wird nun unter Ar-4 %H₂ bei ca. 1600 °C für zwei Stunden gehalten. Dadurch können in der Probe vorhandene Gase austreten und die enthaltenen Bestandteile haben genügend Zeit, um ins Gleichgewicht zu kommen.

4.3.2. Messung

Für die Messung wird die selbst entwickelte Messeinrichtung verwendet. Der Tiegel wird in den Ofen gesetzt. Die Magnetkupplung mit der Spindel wird so weit wie möglich nach unten gefahren. Unter Argon als Schutzgas wird die Probe erhitzt. Ist sie weich genug, wird die Spindel in die Probe gefahren und der Ofen druckdicht verschraubt. Die Aufnahme der Messdaten erfolgt mit der LabVIEW Software. Nach der Messung wird die Spindel im Heißen wieder aus der Probe herausgefahren.

4.3.3. Tiegelreinigung

Um Kosten zu sparen, werden die Tiegel nach dem Versuch gereinigt. Hierzu wird zunächst die Probe mit Hilfe eines Diamanthohlbohrers möglichst großvolumig aus dem Tiegel gebohrt. Am Boden und den Wänden bleibt jetzt immer noch eine dünne Schicht zurück. Diese wird über einen Borataufschluss gelöst. Hierzu wird der Tiegel mit einer Mischung aus 90 wt% Lithium Tetraborat (Li₂B₄O₇) und 10 wt% Lithium Metaborat Dihydrat (LiBO₂·2H₂O) gefüllt. Unter Ar-4 %H₂ zum Oxidationsschutz wird der Molybdäntiegel nun mit einer Heizrate von 2 K/min auf 1100 bis 1150 °C erhitzt und bei dieser Temperatur für 90 Minuten gehalten. Nach dem Abkühlen wird der Tiegel mit Hilfe von Flusssäure gereinigt. Um den Tiegel von letzten Verunreinigungen zu befreien, wird er jetzt noch einmal unter Ar-4 %H₂ für eine Stunde bei ca. 1500 °C geglüht.

5. Untersuchungen realer Schlacken

5.1. Charakterisierung der Proben

Es kommen vier reale Systeme zum Einsatz, dabei handelt es sich um eine spanische Steinkohleschlacke (K2-5) und um drei Vergaserschlacken (S1-1, S1-2, S1-4) aus einer Versuchsanlage. Zunächst wird das Ascheschmelzverhalten der Proben analysiert. Dies geschieht im Rahmen des HotVeGas Projektes an der TU Bergakademie Freiberg. Die Halbkugeltemperatur entspricht beim Ascheschmelzverhalten der Schmelztemperatur. Tabelle 5.1 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen.

Schlacke	Sinter-temp. in °C	Erweichungs-temp. in °C	Spärisch-temp. in °C	Halbkugel-temp. in °C	Fließ-temp. in °C
K2-5	929	1313	1381	1431	1474
S1-1	727	1208	1220	1238	1379
S1-2	798	1240	1281	1299	1460
S1-4	703	1100	1151	1167	1234

Tabelle 5.1.: Ascheschmelzverhalten der realen Schlackesysteme unter reduzierenden Bedingungen

Tabelle 5.2 zeigt die Zusammensetzung der realen Schlackesysteme.

Massenprozent													
Schlacke	Al ₂ O ₃	BaO	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MoO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂	TiO ₂	
K2-5	24,17	0,06	2,00	5,87	4,14	1,27	<0,01	0,50	<0,22	0,06	61,26	0,67	
S1-1	3,25	0,17	21,43	7,79	0,51	6,02	<0,01	2,07	<0,22	0,16	58,26	0,34	
S1-2	25,30	0,80	13,88	2,62	1,86	2,40	<0,01	2,34	<0,22	<0,02	50,28	0,53	
S1-4	12,21	0,36	16,11	7,63	2,59	4,35	0,07	5,93	<0,22	0,14	50,08	0,53	

Molprozent													
Schlacke	Al ₂ O ₃	BaO	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MoO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂	TiO ₂	
K2-5	16,67	0,03	2,51	2,58	3,09	2,21	<0,01	0,57	<0,12	0,05	71,70	0,59	
S1-1	1,96	0,07	23,47	3,00	0,33	9,18	<0,01	2,05	<0,12	0,13	59,56	0,26	
S1-2	16,79	0,35	16,75	1,11	1,33	4,02	<0,01	2,55	<0,12	<0,02	56,64	0,45	
S1-4	7,82	0,15	18,77	3,12	1,80	7,05	0,04	6,25	<0,12	0,11	54,45	0,43	

Tabelle 5.2.: Zusammensetzung der realen Schlackesysteme

5.2. Abschreckversuche

Für die realen Schlacken werden Abschreckversuche bei jeweils drei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Anschließend werden diese polarisationsmikroskopisch und röntgendiffraktometrisch untersucht. Tabelle 5.3 zeigt die durchgeführten Versuche und Ergebnisse der Polarisationsmikroskopie.

Schlacke	Abschreck-temp. in °C	Dünnschliff-analyse	kristalliner Anteil laut XRD-Analyse in %
K2-5	1400	kristallin	16
	1500	kristallin	11
	1575	kristallin	3
S1-1	1175	kristallin	11
	1225	amorph	0
	1275	amorph	0
S1-2	1350	amorph	0
	1400	amorph	0
	1450	amorph	0
S1-4	1125	amorph	7
	1175	amorph	0
	1225	amorph	0

Tabelle 5.3.: *Abschreckversuche der realen Schlacken*

Hier fällt auf, dass die Ergebnisse der XRD-Analyse und der Dünnschliffe nicht immer exakt übereinstimmen. Ein Problem stellt die sehr aufwendige Probenpräparation bei den Dünnschliffen dar. Durch beim Schleifen entstandene Kratzer können mögliche vorhandene, sehr feine Kristalle bei der Polarisationsmikroskopie überlagern. Ein weiteres Problem ist die Auswahl der für die Polarisationsmikroskopie und XRD-Analyse verwendeten Probenteile, da es durchaus möglich ist, dass sich die Kristalle nicht in der gesamten Probe homogen verteilen.

5.2.1. Schlacke K2-5

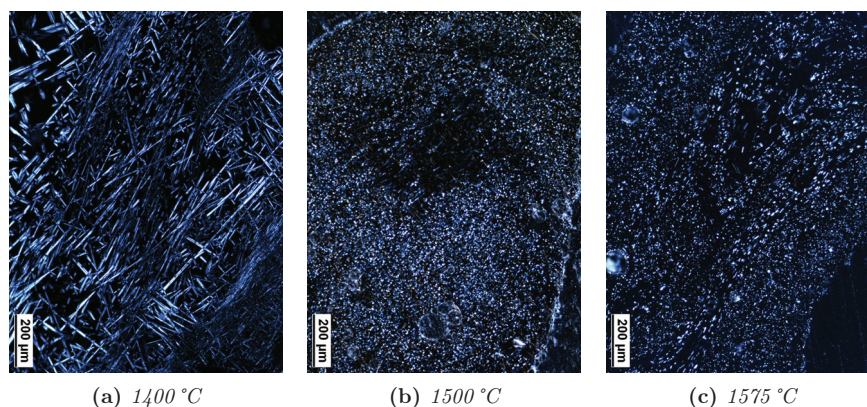


Abbildung 5.1.: *Dünnschliffe von Schlacke K2-5 bei unterschiedlichen Temperaturen*

Abbildung 5.1 zeigt die polarisationsmikroskopischen Untersuchungen der Schlacke K2-5. Bei 1400 °C sind sehr viele nadelförmige Kristalle zu erkennen. Auch die XRD-Analyse zeigt, dass diese Probe einen kristallinen Anteil von 16 % aufweist. Mit steigender Temperatur nehmen die Kristalle in Größe und Anzahl ab. Diese Ergebnisse decken sich mit den XRD-Analysen. Bei 1575 °C liegt der kristalline Anteil bei nur noch 3 %. Für etwas höhere Temperaturen wird die Schlacke K2-5 nur noch amorphe Anteile aufweisen und newtonsches Verhalten zeigen.

5.2.2. Schlacke S1-1

Abbildung 5.2 zeigt die polarisationsmikroskopischen Untersuchungen der Schlacke S1-1. Bei 1175 °C sind sehr deutlich Kristalle zu erkennen. Auch die Ergebnisse der XRD-Analyse decken sich mit diesen Beobachtungen. Der kristalline Anteil beträgt 11 %. Schon bei der nächsthöheren Temperatur von 1225 °C sind keine Kristalle mehr zu erkennen. Auch die XRD-Analyse zeigt keinen kristallinen Anteil mehr. Schlacke S1-1 beginnt zwischen 1175 und 1225 °C nur noch amorphe Anteile aufzuweisen. Entsprechend zeigt auch der Dünnschliff bei 1275 °C keine Kristalle in der Schlacke.

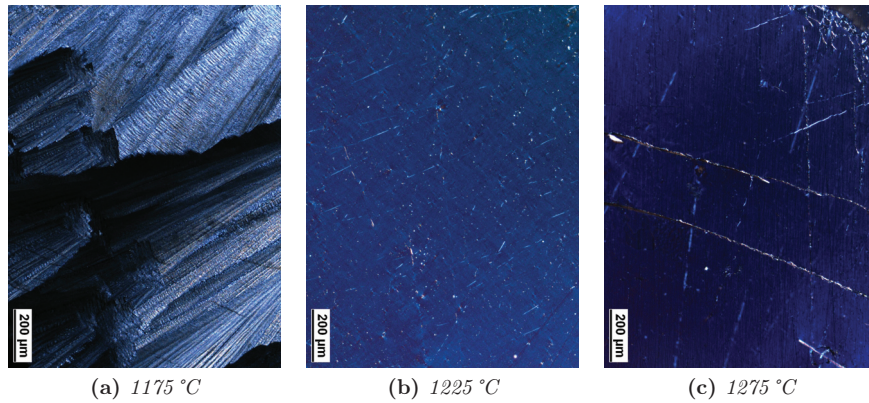


Abbildung 5.2.: Dünnschliffe von Schlacke S1-1 bei unterschiedlichen Temperaturen

5.2.3. Schlacke S1-2

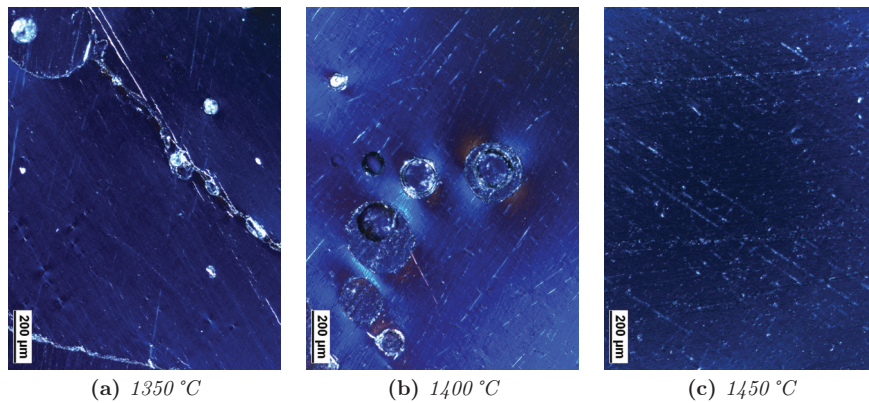


Abbildung 5.3.: Dünnschliffe von Schlacke S1-2 bei unterschiedlichen Temperaturen

Abbildung 5.3 zeigt die polarisationsmikroskopischen Untersuchungen der Schlacke S1-2. Diese Schlacke bildet im untersuchten Temperaturbereich zwischen 1350 und 1450 °C keine Kristalle aus. Die Dünnschliffe bei 1350 und 1400 °C zeigen viele Gasblasen innerhalb der Schlacke. Bei 1350 °C ist außerdem deutlich ein Riss zu erkennen. Bei 1400 °C sind im Dünnschliff deutlich Schleifspuren zu erkennen, die von links unten nach rechts oben verlaufen.

5.2.4. Schlacke S1-4

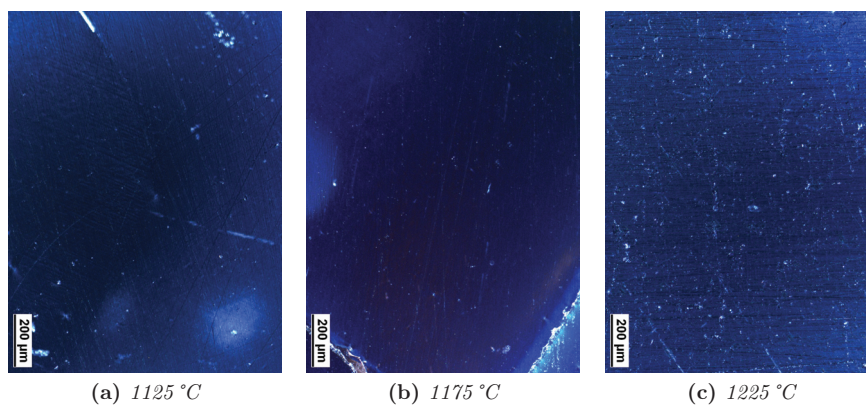


Abbildung 5.4.: Dünnschliffe von Schlacke S1-4 bei unterschiedlichen Temperaturen

Abbildung 5.4 zeigt die polarisationsmikroskopischen Untersuchungen der Schlacke S1-4. Bei der XRD-Analyse wurde bei 1125 °C ein kristalliner Anteil von 7 % ermittelt. Wie schon Schlacke S1-2 zeigt aber auch diese Schlacke bei der Polarisationsmikroskopie keine kristallinen Anteile. Die Dünnschliffe der Schlacke S1-4 zeigen keine Gasblasen oder Risse.

5.3. Viskositätsmessungen

5.3.1. Schlacke K2-5 bei unterschiedlichen Drücken

Die Schlacke K2-5 wird unter einer Ar-4 %H₂-Atmosphäre mit 4 und 7 bar Druck im Temperaturbereich von 1500 bis 1625 °C gemessen. Abbildung 5.5 zeigt die Ergebnisse. Die leichte Viskositätsdifferenz zwischen 4 und 7 bar liegt im Bereich des Messfehlers. Der erhöhte Druck hat demnach keinen messbaren Einfluss auf die Viskosität der Probe.

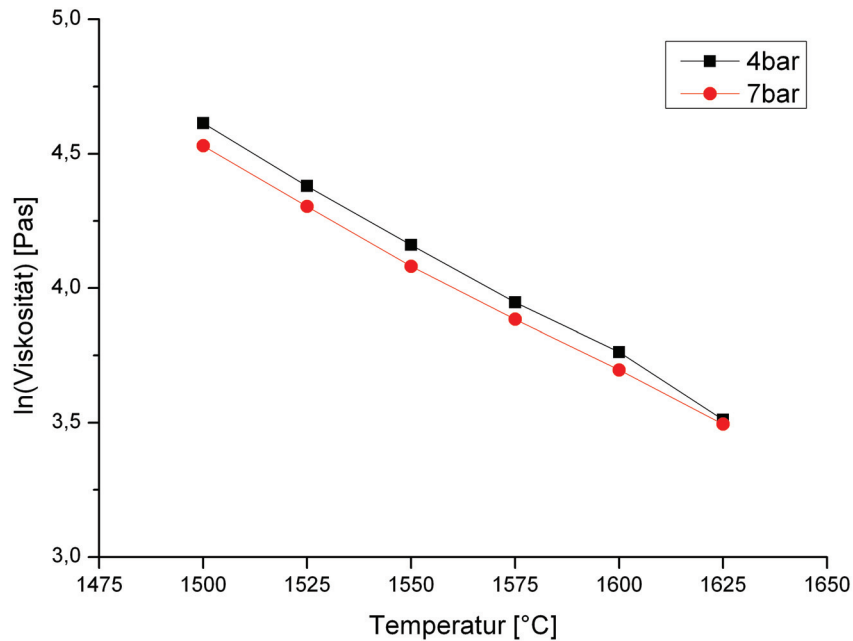


Abbildung 5.5.: Viskositätsmessung der Schlacke K2-5 bei 4 und 7 bar

5.3.2. Schlacke S1-1 bei unterschiedlichen Atmosphären

Jetzt wird an der Probe S1-1 untersucht, welchen Einfluss die Atmosphäre auf die Viskosität hat. Hierzu wird diese Schlacke sowohl unter reduzierendem Ar-4% H_2 als auch unter inerten Bedingungen (Ar) gemessen. In Abbildung 5.6 sind die Ergebnisse dieser Messung dargestellt. Unter reduzierender und inerter Atmosphäre zeigt die Schlacke das gleiche Viskositätsverhalten. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da die Probe vor der Viskositätsmessung bereits ausreichend lange Zeit einer Ar-4% H_2 -Atmosphäre unter Normaldruck bei ca. 1600 °C ausgesetzt war, so dass sich ein Gleichgewicht innerhalb der Probe einstellen konnte.

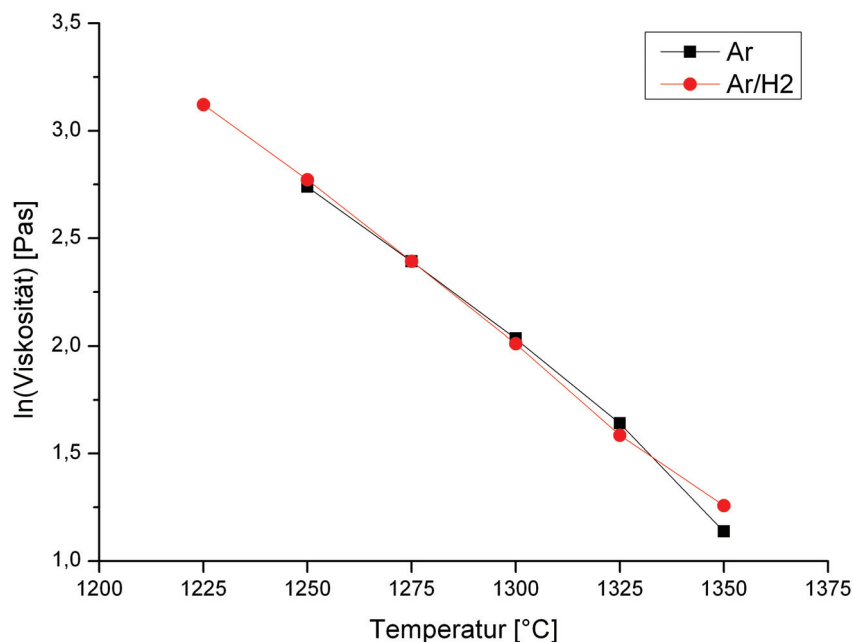


Abbildung 5.6.: Viskositätsmessung der Schlacke S1-1 unter Ar-4 %H₂ und Ar

5.3.3. Vergleich von Viskositätsmessungen mit Modellberechnungen

In diesem Abschnitt werden die gemessenen Viskositätswerte mit Berechnungen des Shaw-Modells (1972), des Lakatos-Modells (1972), des Urbain-Modells (1981) und des Kalmanovitch-Frank-Modells (1988) verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.7 dargestellt. Die Modellierung des Lakatos-Modells liefert bei jeder Schlacke deutlich zu hohe Viskositätswerte.

Bei der Schlacke K2-5 (siehe Abbildung 5.7a) sind die Berechnungen des Kalmanovitch-Frank-Modells mit Abstand am besten. Sie liegen für jeden Messpunkt innerhalb der Fehlergrenze. Shaw und Urbain berechnen zu hohe Viskositäten. Sie liegen aber näher an den Messergebnissen, als die nach Lakatos berechneten Werte.

Bei der Schlacke S1-1 (siehe Abbildung 5.7b) liegen alle Modellberechnungen zu hoch. Kalmanovitch-Frank modelliert im hohen Viskositätsbereich noch passend, sobald $\ln(\eta)$ aber kleiner als 2,5 wird, stimmen die Werte nicht mehr überein. Die Berechnungen nach Shaw und Urbain liefern

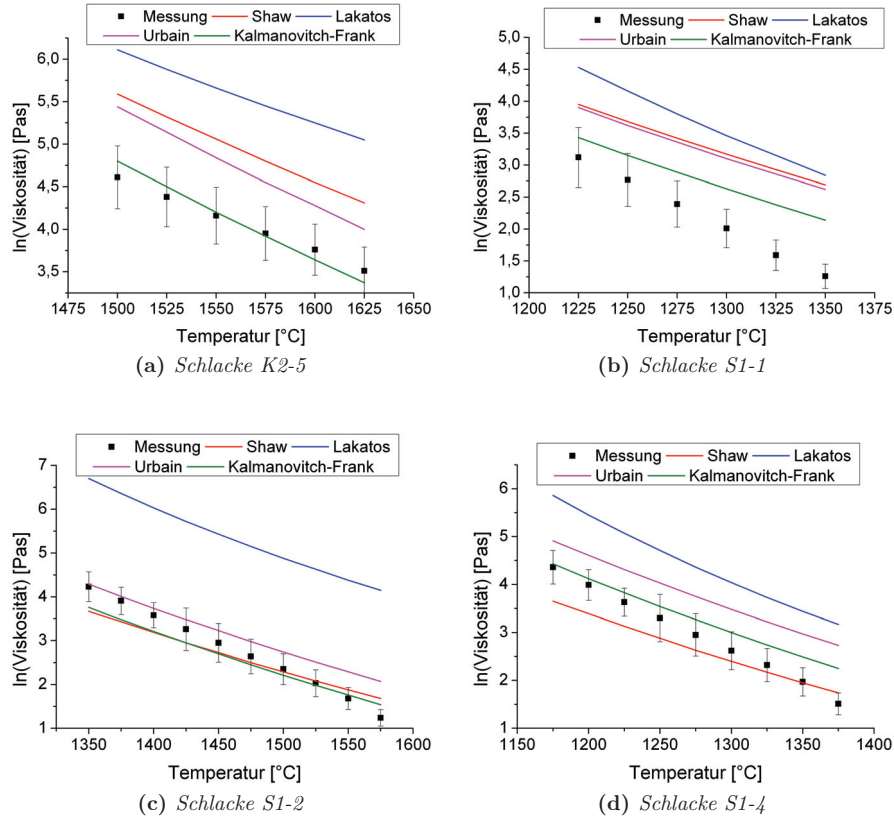


Abbildung 5.7.: Vergleich von Viskositätsmessungen und Modellrechnungen für reale Schlacken

nahezu identische Werte.

Für die Schlacke S1-2 (siehe Abbildung 5.7c) liegen die Berechnungen von drei Modellen in guter Übereinstimmung mit den Messwerten. Das Urbain-Modell passt sich im hohen Viskositätsbereich besser den Messungen an und im unteren Viskositätsbereich stimmen Modellierung und Experiment beim Shaw- und Kalmanovitch-Frank-Modell besser überein. Es ist auffällig, dass Shaw und Kalmanovitch-Frank bei diesem Schlackesystem sehr ähnliche Modellierungsergebnisse liefern.

Bei der Vergaserschlacke S1-4 (siehe Abbildung 5.7d) ist im hohen Viskositätsbereich das

Kalmanovitch-Frank-Modell und im niedrigen Viskositätsbereich das Shaw-Modell am besten geeignet, die Messergebnisse zu beschreiben. Die Berechnungen des Urbain-Modells liegen über den gesamten Viskositätsbereich etwas zu hoch.

Für die vermessenen realen Schlacken liefert das Kalmanovitch-Frank-Modell die besten Ergebnisse. Auch das Shaw-Modell kann zum Teil überzeugen. Die Berechnungen mit dem Urbain-Modell sind nur für die Schlacke S1-2 annähernd richtig. Bei allen anderen Schlacken sind die berechneten Viskositätswerte zu hoch. Beim Lakatos-Modell ist die Abweichung von Modellierung und Experiment mit Abstand am größten. Da die Berechnungsqualität zwischen den einzelnen Schlacken und auch zwischen den verschiedenen Modellen stark schwankt, erscheint die Entwicklung eines neuen Modells zur Berechnungen von realen Schlackeviskositäten in jedem Fall sinnvoll.

5.3.4. Bestimmung der Arrhenius- und der Weymann-Gleichungen

Aus den gemessenen Viskositätswerten lassen sich für jede Schlacke die Arrhenius- und die Weymann-Gleichung aufstellen. Hierzu werden die Faktoren dieser Gleichungen mit Hilfe einer Fitfunktion aus den Messergebnissen bestimmt. In Tabelle 5.4 sind die beiden Gleichungen für die vier Schlackesysteme dargestellt.

Schlacke	Arrhenius-Gleichung	Weymann-Gleichung
K2-5	$\ln(\eta) = -11,830 + \frac{29157}{T}$	$\ln(\eta) = -20,345 + \ln(T) + \frac{30991}{T}$
S1-1	$\ln(\eta) = -19,423 + \frac{33786}{T}$	$\ln(\eta) = -27,751 + \ln(T) + \frac{35309}{T}$
S1-2	$\ln(\eta) = -18,314 + \frac{36623}{T}$	$\ln(\eta) = -26,757 + \ln(T) + \frac{38331}{T}$
S1-4	$\ln(\eta) = -17,449 + \frac{31587}{T}$	$\ln(\eta) = -25,777 + \ln(T) + \frac{33107}{T}$

Tabelle 5.4.: Arrhenius- und Weymann-Gleichung für die realen Schlackesysteme, Temperatur T in K

Mit Hilfe dieser Gleichungen lassen sich Viskositätswerte in bisher nicht gemessenen Temperaturbereichen berechnen. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die Gleichungen nur für den Bereich gelten, in dem sich die Schlacken newtonsch verhalten. Dies ist der Fall, wenn

sich die Schlacke in der Vollschmelze befindet. Bei zu niedrigen Temperaturen kommt es irgendwann zur Auskristallisation einzelner Phasen und die Viskosität kann dadurch sprunghaft ansteigen. Solche Effekte werden von den Gleichungen nicht berücksichtigt.

5.3.5. Viskosität und Basizität

Tabelle 5.5 zeigt die mit Hilfe der Formel 2.13 berechnete Basizität für die unterschiedlichen Schlacken.

Schlacke	Basizität
K2-5	0,0916
S1-1	0,5408
S1-2	0,3289
S1-4	0,5146

Tabelle 5.5.: *Basizität der realen Schlackesysteme*

Schlacke K2-5 hat mit 0,0916 die mit Abstand niedrigste Basizität. Alle drei Vergaserschlacken liegen von der Größenordnung im gleichen Basizitätsbereich. S1-1 und S1-4 haben beide eine Basizität von ca. 0,5 und die Schlacke S1-2 von ca. 0,3. In Abbildung 5.8 ist für alle Schlacken die Viskositäts-Temperatur-Abhängigkeit dargestellt. Die beiden Schlacken S1-1 und S1-4, die fast eine identische Basizität haben, liegen im Viskositäts-Temperatur-Diagramm sehr nahe beieinander. Die Schlacke S1-1 mit der höchsten Basizität liegt jedoch ein Stück weiter links im Diagramm. Die Schlacke K2-5 mit der niedrigsten Basizität liegt in diesem Diagramm am weitesten rechts und die Schlacke S1-2, die von der Basizität zwischen den Schlacken S1-4 und K2-5 liegt, findet man auch im Diagramm zwischen diesen beiden Schlacken wieder. Die Basizität gibt das Verhältnis der in der Schlacke vorhandenen Netzworkebildner und Netzworkewandler an. Je mehr Netzworkebildner sich in der Schlacke befinden, desto kleiner wird die Basizität. Eine große Anzahl von Netzworkebildner sorgt für eine verkettete Struktur innerhalb der Schlacke, womit die Viskosität bei gleicher Temperatur im Vergleich zu weniger netzworkebildnerreichen Schlacken steigt. Eine hohe Basizität steht entsprechend für einen hohen Netzworkewandleranteil in der Schlacke. Die Netzworkewandler brechen die Schlackestruktur auf und verringern damit die Viskosität.

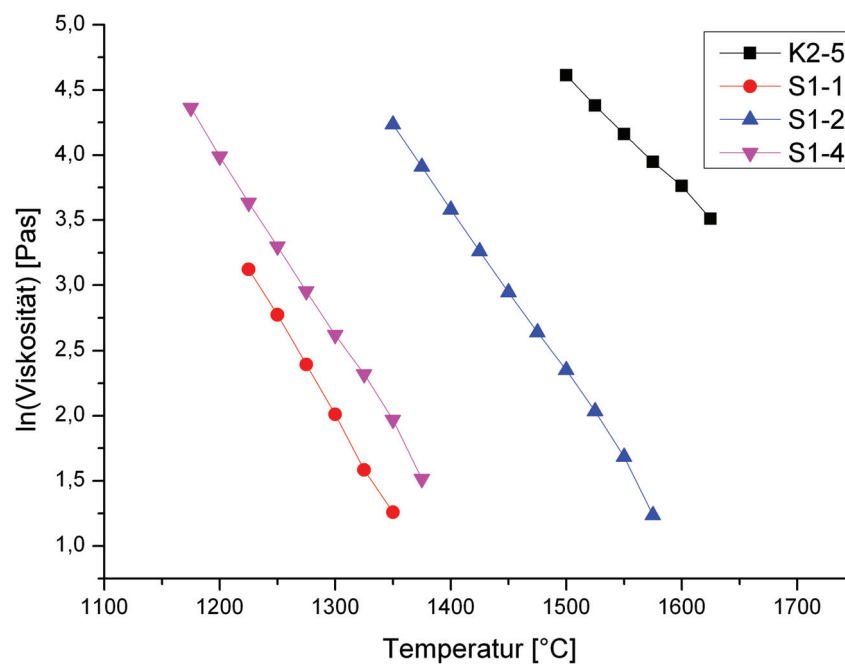


Abbildung 5.8.: Viskositätsmessungen der realen Schlacke

6. Entwicklung eines Modells zur Berechnung von Viskositäten

6.1. Theoretische Grundlagen und Vorgehensweise

6.1.1. Berechnungsmethoden der unterschiedlichen Modelle

In Abbildung 6.1 ist die Methodik der Viskositätsberechnung graphisch dargestellt.

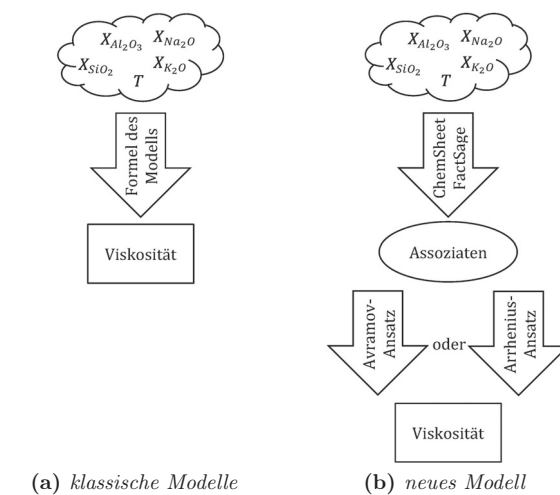


Abbildung 6.1.: Methode der Viskositätsberechnung bei unterschiedlichen Modellen

Die klassischen schlackespezifischen Modelle (siehe Seite 32) werden in ihrem Gültigkeitsbe-

reich zum Teil von ihren Entwicklern eingeschränkt. So eignen sich manche Modelle nur für spezielle Zusammensetzungs- oder Temperaturbereiche. Diese Modelle berücksichtigen nur die Zusammensetzungsverteilung der Grundoxide (z.B. SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O). Zu ihnen gehören die Modelle von Bottinga-Weill (1972), Shaw (1972), Lakatos (1972), Urbain (1981), Riboud (1981), Streeter (1984) und Kalmanovitch-Frank (1988). Die Verteilung der Grundoxide und die Temperatur werden in eine modellspezifische Formel eingesetzt und die Viskosität wird berechnet (siehe Abbildung 6.1a).

Beim Assoziatenmodell wird hingegen die innere Schlackestruktur berücksichtigt. In flüssigen Silikatschlacken liegen die Grundoxide nicht ausschließlich in ihrer ursprünglichen Form vor. Es bilden sich neue Struktureinheiten.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell baut auf dem Assoziatenmodell auf (siehe Seite 42). Dabei wird angenommen, dass die flüssige Schlacke aus sogenannten Assoziaten besteht. [48] Diese Assoziaten sind chemische Verbindungen, die sich aus den Ursprungssubstanzen bilden lassen. Die Konstituenten SiO_2 und Al_2O_3 bilden beispielsweise den Assoziaten $\text{Si}_2\text{Al}_6\text{O}_{13}$ ($2\text{SiO}_2 + 3\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Si}_2\text{Al}_6\text{O}_{13}$). In der flüssigen SiO_2 - Al_2O_3 Schmelze befinden sich nach dem Assoziatenmodell drei unterschiedliche Struktureinheiten: SiO_2 , Al_2O_3 und $\text{Si}_2\text{Al}_6\text{O}_{13}$. Für die bei dieser Modellentwicklung berücksichtigten Assoziaten wird auf eine von FZJ und GTT entwickelte FactSage Datenbank ([80], [81], [82], [83], [84]) zurückgegriffen, die für thermochemische Berechnungen konzipiert wurde. Ziel bei der Entwicklung des Viskositätsmodells ist die Verwendung genau dieser Assoziate, da sich alle thermochemischen und thermophysikalischen Eigenschaften über diese einheitlichen Grunddaten bestimmen lassen sollen und untereinander konsistent sein sollen. Nachdem die Verteilung der Assoziaten mit Hilfe von ChemSheet und FactSage berechnet wurde, lässt sich über zwei unterschiedliche mathematische Beschreibungen die Viskosität berechnen (siehe Abbildung 6.1b). Auf die mathematischen Hintergründe wird im nächsten Abschnitt genauer eingegangen.

In dieser Arbeit wird ein Modell für das System SiO_2 - Al_2O_3 - Na_2O - K_2O entwickelt. In diesem System gibt es 19 unterschiedliche Assoziate, die in Tabelle 6.1 aufgeführt sind.

Für das Gesamtsystem SiO_2 - Al_2O_3 - Na_2O - K_2O gibt es keine eigenen quaternären Assoziate.

Assoziat in Datenbank	Kurzform	enthaltene Elemente				
		Anzahl	Si	Al	Na	K
Na ₂ O	Na ₂ O	2			x	
Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	2		x		
K ₂ O	K ₂ O	2				x
KAlO ₂	KAlO ₂	3		x		x
K ₂ Al ₄ O ₇ *	K ₂ Al ₄ O ₇ *	3		x		x
K ₄ Si ₂ O ₆	K ₂ SiO ₃	3	x			x
K ₂ Si ₂ O ₅	K ₂ Si ₂ O ₅	3	x			x
K ₂ Si ₄ O ₉	K ₂ Si ₄ O ₉	3	x			x
Si ₂ O ₄	SiO ₂	2	x			
Si ₂ Na ₈ O ₈	SiNa ₄ O ₄	3	x		x	
Si ₂ Na ₄ O ₆	SiNa ₂ O ₃	3	x		x	
Si ₂ Na ₂ O ₅	Si ₂ Na ₂ O ₅	3	x		x	
Si ₂ Al ₆ O ₁₃	Si ₂ Al ₆ O ₁₃	3	x	x		
Si ₂ Al ₂ Na ₂ O ₈	SiAlNaO ₄	4	x	x	x	
Si ₆ Al ₂ Na ₂ O ₁₆	Si ₃ AlNaO ₈	4	x	x	x	
Al ₄ Na ₂ O ₇ *	Al ₄ Na ₂ O ₇ *	3		x	x	
NaAlO ₂	NaAlO ₂	3		x	x	
KSi ₂ AlO ₆	KSi ₂ AlO ₆	4	x	x		x
K ₂ Si ₂ Al ₂ O ₈	KSiAlO ₄	4	x	x		x

* keine real existierende Verbindung

Tabelle 6.1.: Assoziat im System SiO₂-Al₂O₃-Na₂O-K₂O

6.1.2. Mathematische Beschreibung

Bei der mathematischen Beschreibung des neu entwickelten Viskositätsmodells werden zwei unterschiedliche Strategien verfolgt. Zum einen wird die aus dem Avramov-Modell bekannte Gleichung modifiziert und dem Assoziatenmodell angepasst und zum anderen wird eine Formel entwickelt, die auf der Arrhenius-Gleichung aufbaut.

Der Avramov-Ansatz

Als Grundlage des Avramov-Ansatzes dient die von Avramov 2003 entwickelte Gleichung 2.48 (siehe Seite 44) zur Beschreibung von Viskositäten silikatischer Schlacken:

$$\eta = \frac{\eta_0}{\sum_{i=0}^4 Q_n \cdot \exp\left(-\frac{E_n}{R \cdot T}\right)}$$

Diese Avramov-Gleichung wird modifiziert und für ein System mit N unterschiedlichen Struktureinheiten erweitert. Statt eines temperatur- und zusammensetzungsabhängigen η_0 wird für jeden Assoziaten eine eigene Konstante $\eta_{0,i}$ eingeführt. $\frac{E_n}{R}$ wird zum Parameter θ_i zusammengefasst. α_i wird als zusätzlicher Parameter eingeführt, um mehr Freiräume bei der Modellentwicklung zu erhalten.

$$\eta = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\eta_{0,i}} \cdot X_i \cdot \exp\left[-\left(\frac{\theta_i}{T}\right)^{\alpha_i}\right]} \quad (6.1)$$

Das neue Modell für die Viskositätsberechnung baut auf dieser modifizierten Avramov-Gleichung auf. Für eine übersichtlichere Größe der Variablen θ_i wird noch ein Faktor hinzugefügt und die Viskosität wird als natürlicher Logarithmus dargestellt. Die modifizierte Avramov-Gleichung, wie sie bei der Modellierung verwendet wird, lautet:

$$\ln(\eta) = \ln\left(\frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{X_i}{\eta_{0,i}} \cdot \exp\left[-\left(\frac{1000 \cdot \theta_i}{T}\right)^{\alpha_i}\right]}\right) \quad (6.2)$$

Für die Variablen gilt $\theta_i \geq 0$, $\alpha_i \geq 0$ und $\ln(\eta_{0,i}) \leq 0$.

Der Arrhenius-Ansatz

Der Arrhenius-Ansatz baut auf der bei Vargha beschriebenen Gleichung 2.29 auf (siehe Seite 33):

$$\log(\eta) = \log(a) + \frac{b}{T}$$

Für die Faktoren a und b werden die Ausdrücke $\eta_{0,i}$ und θ_i verwendet. Wie schon beim Avramov-Ansatz sorgt ein zusätzlicher Faktor vor θ_i für eine übersichtlichere Größe dieser Variablen. Es wird angenommen, dass die Viskosität der Schlacke der Summe aller Assoziatviskositäten entspricht. Für N Assoziate ergibt sich die Formel:

$$\ln(\eta) = \sum_{i=1}^N X_i \cdot \left[\ln(\eta_{0,i}) + \frac{1000 \cdot \theta_i}{T} \right] \quad (6.3)$$

Für die Variablen gilt $\theta_i \geq 0$ und $\ln(\eta_{0,i}) \leq 0$.

Vergleich der beiden Ansätze

Beide Formeln, die für die Berechnung der Viskositäten eingesetzt werden, haben den Vorteil, dass sie sich um weitere Assoziate erweitern lassen. Das gesamte Modell lässt sich dadurch einfach um weitere Komponenten, wie beispielsweise CaO , MgO oder FeO , erweitern.

Beim Arrhenius-Ansatz existieren zu jedem Assoziat zwei Variablen ($\eta_{0,i}$, θ_i). Der Avramov-Ansatz enthält mit α_i eine weitere Variable für jeden Assoziat. Für die Optimierung der Variablen einzelner Assoziate bedeutet eine niedrigere Anzahl eine Verkürzung der benötigten Rechenzeit für einzelne Optimierungsschritte. Durch die zusätzliche Variable ist der Avramov-Ansatz aber flexibler, was die Möglichkeiten der Optimierung angeht.

Avramovs Absicht lag in der Beschreibung des „Lubricant Effekts“. Bei diesem Effekt tritt eine drastische Viskositätsverringern auf, wenn zu reinem SiO_2 nur eine minimale Menge Alkali-Oxid hinzugefügt wird. [51] Dieser Effekt lässt sich mit der Netzwerktheorie erklären, nach der SiO_2 als stärkster Netzbildner für eine stark ausgeprägte Struktur innerhalb der Schlacke sorgt, die eine hohe Viskosität zur Folge hat. Schon kleine Mengen von Netzwerkwandlern brechen diese Struktur auf und sorgen für eine starke Viskositätsverringern. Leko hat diesen Effekt 1977 im System $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ gemessen. [85] In Abbildung 6.2 ist der Viskositätssprung hin zu reinem SiO_2 gut zu erkennen. Dieser steile Anstieg lässt sich über die Avramov-Gleichung mathematisch beschreiben. Es muss jedoch beachtet werden, dass Lekos Messung bei einer Temperatur von 1200°C durchgeführt wurde. Bei dieser Temperatur liegt nicht über den gesamten Konzentrationsbereich Vollschmelze vor. Bei höheren Temperaturen wurden bisher keine Messungen zu diesem Effekt durchgeführt.

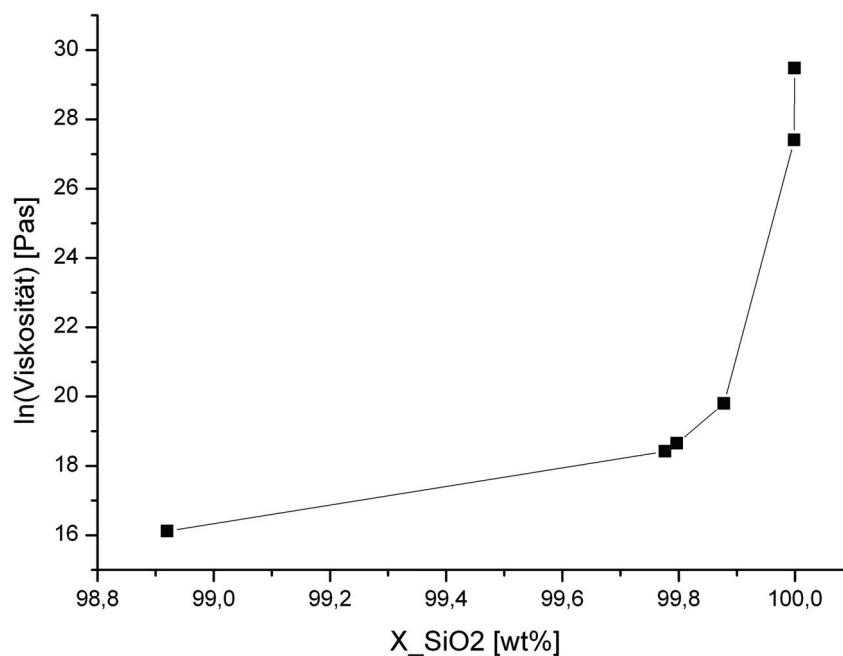


Abbildung 6.2.: Messdaten von Leko [85] im $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ -System bei 1200 °C

Der Viskositätsverlauf von newtonschen Flüssigkeiten lässt sich in Abhängigkeit von der Temperatur immer über eine Arrhenius-Gleichung beschreiben. Hier liegt der große Vorteil des Arrhenius-Ansatzes, da er aus einer Summe einzelner Arrhenius-Gleichungen besteht.

6.1.3. Vorgehensweise bei der Modellentwicklung

Da sowohl der Avramov- als auch der Arrhenius-Ansatz gewisse Vor- und Nachteile bietet, wird das Modell in dieser Arbeit für die beiden unterschiedlichen Ansätze getrennt entwickelt.

Für die Bestimmung der Variablen sind Messdaten von Viskositätsmessungen erforderlich.

Zunächst werden bei einer Literaturrecherche mit der Datenbank SciGlass alle relevanten Messpunkte erfasst. Im nächsten Schritt erfolgt eine Datenselektion der gefundenen Literaturwerte. Der so erstellte Datensatz dient als Grundlage für die Bestimmung der unterschied-

lichen Assoziat-Variablen.

Als Startparameter werden die Werte $\ln(\eta_{0,i}) = -3$, $\theta_i = 11$ und $\alpha_i = 1$ gewählt. Die Optimierung erfolgt mit dem Microsoft Excel SOLVER. Für die Qualitätsbestimmung der Optimierung wird die mittlere absolute Abweichung von experimentellen und berechneten Werten herangezogen.

Berechnungen der beiden Modellansätze des neuen Viskositätsmodells werden mit Messwerten aus der Literatur verglichen, um einen Eindruck von der Qualität des Modells zu erhalten. Zusätzlich wird das neue Modell mit bereits in der Literatur vorhandenen Modellen verglichen.

6.2. Literaturrecherche und Datenselektion für die Modellentwicklung

Wie bereits in den theoretischen Grundlagen beschrieben, werden die einzelnen Variablen über eine möglichst genaue Anpassung der mathematischen Funktion (modifizierte Avramov- oder Arrhenius-Gleichung) an vorhandene Messwerte bestimmt. Bei der Betrachtung der SciGlass Literaturrecherche für das System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ (siehe Seite 45), fällt auf, dass es für manche Untersysteme (Na_2O , K_2O , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ und $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$) keinerlei Viskositätsmesswerte in der Literatur gibt. Die Variablen dieser Assoziate müssen dann über Messwerte aus höheren Systemen bestimmt werden. Beispielsweise lassen sich die Variablen des Na_2O Assoziats auch mit Messwerten des Systems $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ bestimmen.

Ein weiteres und viel größeres Problem ist die Qualität der vorhandenen Daten. Als Beispiel soll das Binärsystem $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ betrachtet werden. Es gibt den Fall, dass Messdaten von verschiedenen Autoren weit streuen und dabei keine eindeutige Tendenz zu erkennen ist. Dies ist beispielsweise bei der Zusammensetzung $X_{\text{SiO}_2} = 0,40$ in Abbildung 6.3a der Fall.

Einfacher wird es bei der Zusammensetzung $X_{\text{SiO}_2} = 0,51$ in Abbildung 6.3b. Hier ist eindeutig zu erkennen, dass die Messwerte von Heidtkamp, Preston, Mizoguchi und Winter-Klein in eine Richtung tendieren. Die Messwerte von Endell und Yamane stimmen mit diesem Trend nicht überein.

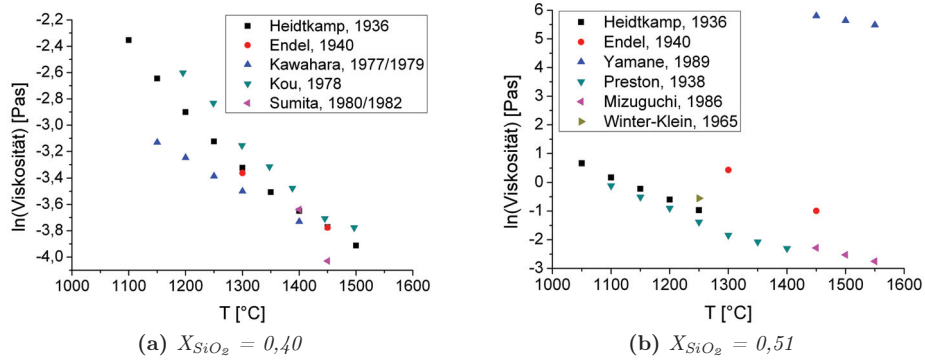


Abbildung 6.3.: Messdaten im SiO_2 - Na_2O -System

Ein ähnliches Bild ist bei $X_{\text{SiO}_2} = 0,61$ zu erkennen (siehe Abbildung 6.4). Hier gibt es Daten von neun unterschiedlichen Autoren. Bis auf die Messwerte von Skryabin und Yamane liegen alle auf einer Kurve.

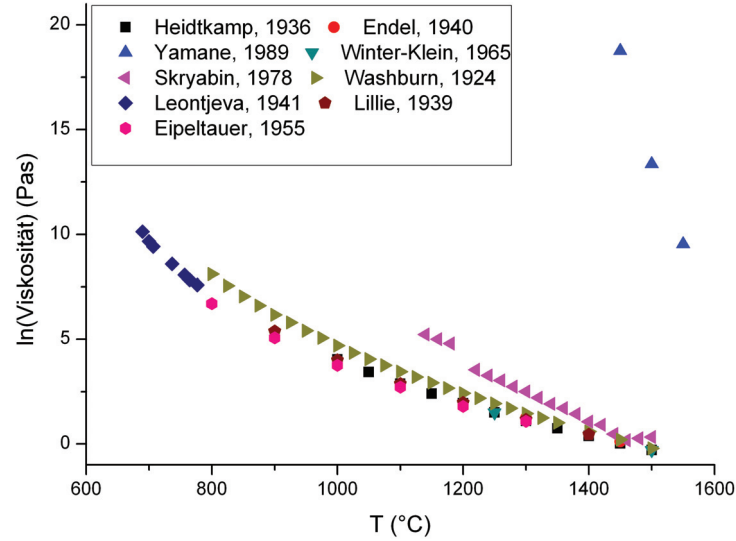


Abbildung 6.4.: Messdaten im SiO_2 - Na_2O -System mit $X_{\text{SiO}_2} = 0,61$

Schon diese wenigen Beispiele zeigen, wie wichtig eine Datenselektion vor der eigentlichen Bestimmung der Variablen ist. Für die Auswahl der später verwendeten Messpunkte wird nach folgendem Schema vorgegangen:

1. Da das entwickelte Modell auf die Berechnungen von Viskositäten in Vollschmelzen ausgelegt ist, wird mit ChemSheet und FactSage berechnet, welche Messpunkte sich in der Vollschmelze befinden. Als Vollschmelze werden alle Systeme angenommen, die sich rein aus den 19 Assoziaten zusammensetzen und keinerlei feste Bestandteile enthalten.
2. Alle Messpunkte aus Systemen gleicher Zusammensetzung werden in Viskositäts-Temperatur-Diagrammen eingetragen. Stimmen in diesen Diagrammen die Messpunkte unterschiedlicher Autoren überein, so gelten die Daten als vertrauenswürdig. Gibt es innerhalb eines Diagramms einen eindeutigen Trend des Viskositätsverlaufs und stimmen Daten einzelner Autoren mit diesem nicht überein, so gelten diese als nicht vertrauenswürdig. Daten von Autoren, die nicht mit anderen Daten verglichen werden können, sind nicht nachprüfbare Daten.
3. Gibt es nach dieser ersten Eingruppierung Autoren, die teilweise vertrauenswürdige Daten und teilweise nicht vertrauenswürdige Daten liefern, so werden diese vollständig den nicht vertrauenswürdigen Daten zugeordnet. Autoren die teilweise nicht nachprüfbare Daten veröffentlicht haben, gelten als vertrauenswürdig, wenn andere Messpunkte von ihnen mit Dritten verglichen werden konnten und als vertrauenswürdig eingestuft wurden.

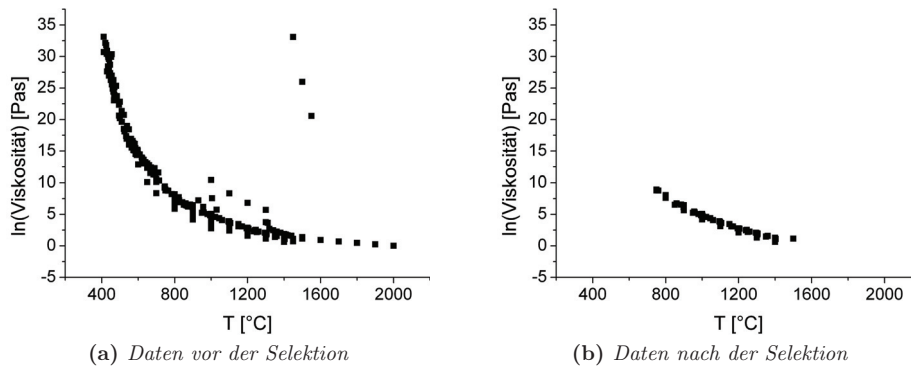


Abbildung 6.5.: Datenselektion am Beispiel des $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ -Systems mit $X_{\text{SiO}_2} = 0,67$

Abbildung 6.5 zeigt am Beispiel des $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ -Systems mit $X_{\text{SiO}_2} = 0,67$, wie sich die beschriebene Datenselektion auswirkt. Insgesamt ist für das System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ und seine Untersysteme nach der Selektion für die eigentliche Modellentwicklung die Datenmenge wie in Tabelle 6.2 dargestellt vorhanden.

System	Datenquellen	Messpunkte
SiO_2	11	239
Al_2O_3	1	15
$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	3	81
$\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$	32	699
$\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$	12	168
$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$	15	349
$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$	4	36
$\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$	4	48
$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$	5	71

Tabelle 6.2.: Nach der Selektierung vorhandene Daten für die Modellentwicklung im System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$

Detaillierte Informationen über die einzelnen Datenpunkte mit genauer Zusammensetzung der Schmelze, Temperatur, gemessener Viskosität, Autor, Veröffentlichungsjahr, SciGlass-ID und einer Quellenangabe sind im Anhang A.5 zu finden.

6.3. Bestimmung der Variablen

Um einen ersten Eindruck der Qualität des Modells zu erhalten, wird für jeden Messpunkt die Viskosität berechnet. Für alle Systeme wird ein $\ln(\eta)_{\text{sim}}\text{-}\ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramm erstellt. Anhand dieser Diagramme kann verifiziert werden, wie sich die Veränderung einzelner Faktoren auf die Qualität des Modells auswirkt.

Für die Optimierung der einzelnen Faktoren ist es hilfreich, neben dieser optischen Methode auch eine mathematische Qualitätskontrolle einzuführen. Hierzu wird von jedem vorhandenen Messpunkt ($\ln(\eta)_{\text{exp}}$) die absolute Abweichung zur Modellrechnung ($\ln(\eta)_{\text{sim}}$) bestimmt. Aus diesen Werten wird für jedes System die mittlere absolute Abweichung bestimmt:

$$\overline{\Delta\eta} = \frac{\sum |\ln(\eta)_{\text{exp}} - \ln(\eta)_{\text{sim}}|}{N} \quad (6.4)$$

Dabei ist N die Anzahl der verwendeten Messpunkte. Über eine Minimierung dieses Ausdrucks durch Änderung der Variablen wird das Modell optimiert. Als Tool wird auf den Microsoft Excel SOLVER zurückgegriffen. Als Startparameter wird für alle Faktoren $\ln(\eta_{0,i}) = -3$, $\theta_i = 11$ und $\alpha_i = 1$ gewählt.

Bei der Optimierung der Modelle fällt auf, dass eine leichte Veränderung der Variablen mancher Assoziat die Berechnungsergebnisse kaum beeinflussen. Dies hat mit der Verteilung der Assoziat innerhalb der einzelnen Systeme zu tun.

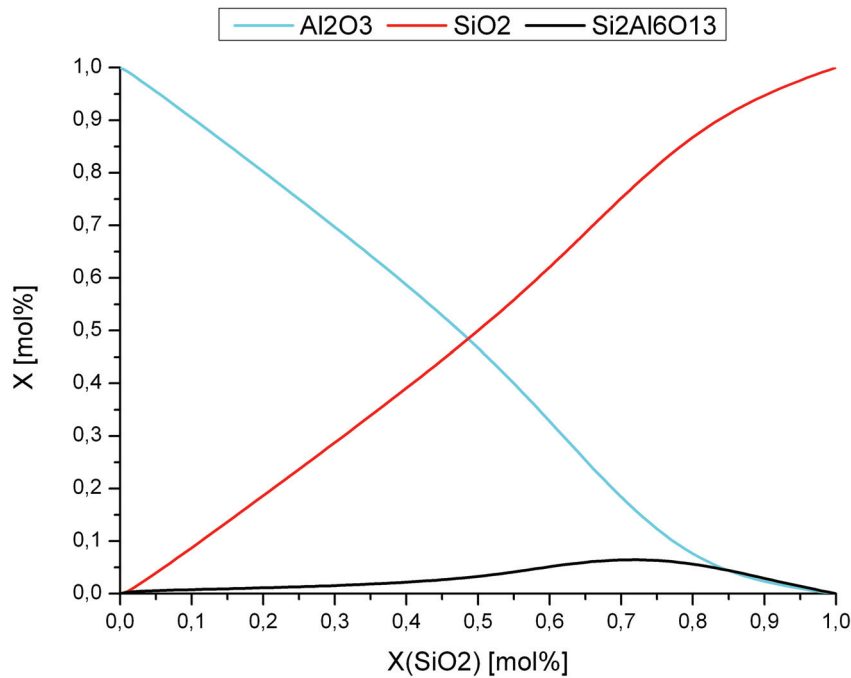


Abbildung 6.6.: Verteilung der Assoziaten im System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ bei $2000\text{ }^\circ\text{C}$

Im System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ hat der Assoziat $\text{Si}_2\text{Al}_6\text{O}_{13}$ fast keinen Einfluss auf das Ergebnis der Viskositätsberechnung. Abbildung 6.6 zeigt die Verteilung in diesem System bei $2000\text{ }^\circ\text{C}$. Es ist deutlich zu erkennen, dass dieses System von den beiden Reinsubstanzen SiO_2 und Al_2O_3 dominiert wird. Der molare Anteil vom Assoziat $\text{Si}_2\text{Al}_6\text{O}_{13}$ liegt für alle Zusammensetzungen unter 10 %. Entsprechend gering wirkt sich eine Änderung der Faktoren von diesem Assoziaten auf die berechnete Viskosität in diesem System aus.

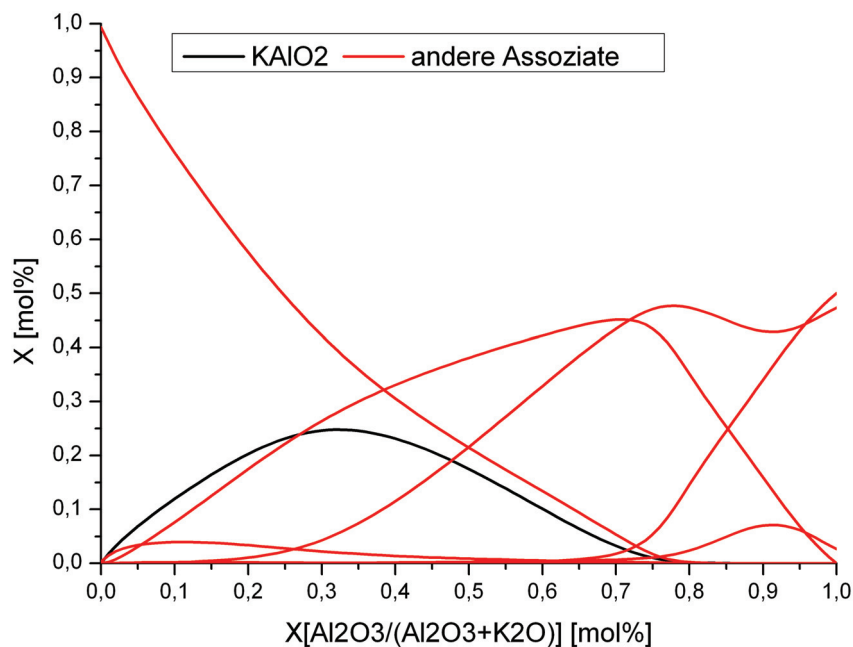


Abbildung 6.7.: Verteilung der Assoziaten im System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ bei 1800°C mit festem 50 mol% Anteil SiO_2

Abbildung 6.7 zeigt die Assoziatenverteilung im System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ bei 1800°C mit einem festen Anteil von 50 mol% SiO_2 . Das Verhältnis zwischen Al_2O_3 und K_2O wird variiert. Der Assoziat KAlO_2 existiert bei diesen Bedingungen nur, wenn mehr als 15 mol% K_2O im System vorhanden sind. Für Systeme dieser Zusammensetzung bei dieser Temperatur existieren in der Literatur keine Messwerte. Es ist also nicht möglich, unter diesen Bedingungen die Faktoren des KAlO_2 Assoziats zu optimieren. Dies ist ein typisches Problem, welches insbesondere bei Schmelzen mit sehr hohen Alkalioxidanteilen ($> 50\text{ mol\%}$) auftritt, da es in diesen Bereichen nahezu keinerlei Messungen von Viskositätswerten gibt. Die Präparation der Systeme ist für solch hohe Alkalianteile kompliziert. Messungen sind nur schwer durchzuführen, da die Alkalien bei diesen hohen Konzentrationen und Temperaturen leicht aus der Schmelze ausdampfen und sich somit während der Messung die Zusammensetzung und damit die Viskosität ändert.

Während der Optimierungsphase hat sich beim Arrhenius-Ansatz herausgestellt, dass SiO_2

eine besondere Rolle einnimmt. Aufgrund der starken netzwerkbildenden Eigenschaft ist es nötig, zwischen reinem SiO_2 und SiO_2 , welches in einer Mischung mit anderen Oxiden vorkommt, zu unterscheiden. Es werden für diese beiden Formen unterschiedliche Werte für θ und η_0 berechnet.

Bei der Modellentwicklung wurden die Faktoren der Assoziante wie in Tabelle 6.3 aufgeführt, ermittelt.

Assoziaten	Avramov-Ansatz			Arrhenius-Ansatz	
	α_i	θ_i	$\ln(\eta_{0,i})$	θ_i	$\ln(\eta_{0,i})$
Na_2O	1,000	11,000	-3,000	11,014	-2,980
Al_2O_3	2,145	6,721	-12,278	12,586	-8,487
K_2O	0,987	11,000	-3,001	11,062	-2,921
KAlO_2	1,800	-15,969	-3,939	26,590	-4,625
$\text{K}_2\text{Al}_4\text{O}_7$	0,980	11,000	-3,003	10,550	-4,191
K_2SiO_3	1,292	7,389	-5,763	6,948	-5,977
$\text{K}_2\text{Si}_2\text{O}_5$	2,175	11,067	-3,803	26,008	-8,683
$\text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9$	1,318	9,481	-8,743	5,884	-13,465
SiO_2	1,000	69,224	-19,308	-	-
SiO_2 rein	-	-	-	69,265	-19,323
SiO_2 misch	-	-	-	18,322	-7,092
SiNa_4O_4	3,287	1,954	-4,381	7,712	-12,901
SiNa_2O_3	2,685	14,515	-15,457	22,684	-14,469
$\text{Si}_2\text{Na}_2\text{O}_5$	1,656	10,675	-3,471	20,045	-11,144
$\text{Si}_2\text{Al}_6\text{O}_{13}$	1,748	11,039	-2,927	49,708	-45,159
SiAlNaO_4	1,818	11,040	-2,935	2,535	-1,038
$\text{Si}_4\text{AlNaO}_8$	2,368	11,000	-3,000	104,685	-35,605
$\text{Al}_4\text{Na}_2\text{O}_7$	1,000	11,000	-3,000	11,000	-3,000
NaAlO_2	1,603	11,167	-1,298	101,494	-1,827
KSi_2AlO_6	1,834	12,274	-0,637	16,278	0,000
KSiAlO_4	1,000	11,000	-3,000	11,000	-3,000

Tabelle 6.3.: Modellparameter für das System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ nach der Optimierung

Einige Variablen entsprechen den Startwerten. Diese Assoziante scheinen bei den vorhandenen Messpunkten immer nur in so einer geringen Konzentration in der Schmelze vorzuliegen, dass sie nahezu keinen Beitrag zur Viskosität leisten. Es ist jedoch möglich, dass sie bei thermochemischen Berechnungen wichtig sind. Da das neue Modell mit diesen Berechnungen konsistent sein soll, werden die Assoziante beibehalten.

6.4. Qualität des neuen Modells

In diesem Abschnitt wird die Qualität des neu entwickelten Modells untersucht. Hierfür wird für jedes System das $\ln(\eta)_{\text{sim}} - \ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramm mit allen bei der Modelloptimierung verwendeten Messdatenpunkten erstellt. Für die Berechnungen wird hierbei sowohl der Avramov- als auch der Arrhenius-Ansatz verwendet. Zusätzlich werden für einzelne Systeme Modellberechnungen mit den beiden Ansätzen durchgeführt und mit den Literaturwerten verglichen.

SiO₂

Wie Abbildung 6.8 zeigt, liefern Avramov- und Arrhenius-Ansatz nahezu identische Ergebnisse. Experimentelle und modellierte Werte stimmen über den gesamten Viskositätsbereich gut überein.

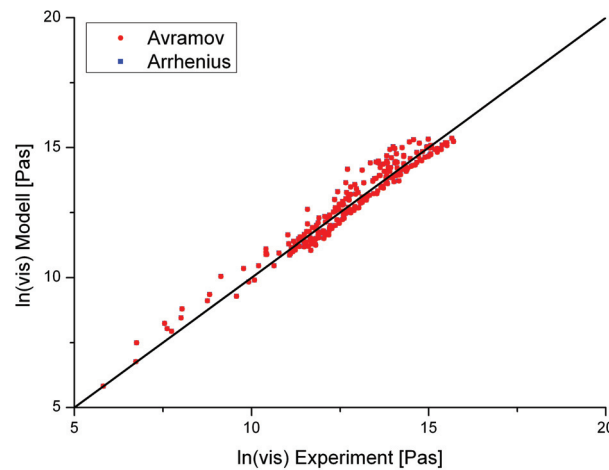


Abbildung 6.8.: $\ln(\eta)_{\text{sim}} - \ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramm für SiO₂

In Abbildung 6.9 ist zu erkennen, dass das Modell über einen sehr weiten Temperaturbereich gut mit den Messergebnissen übereinstimmt. Auch hier wird deutlich, dass es zwischen Avramov- und Arrhenius-Ansatz für SiO₂ keinen Unterschied in den berechneten Viskositätswerten gibt.

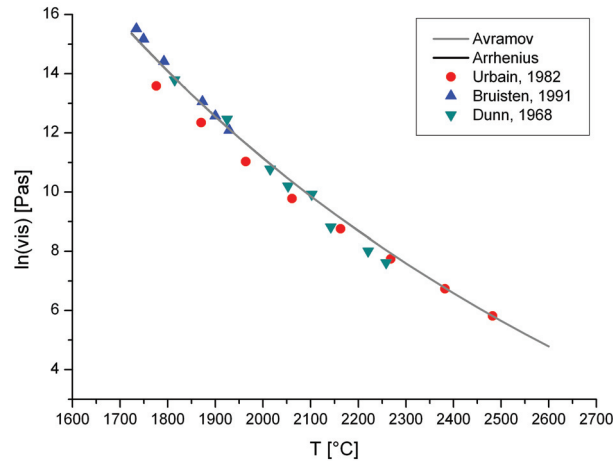


Abbildung 6.9.: Vergleich von Modellrechnungen mit Messwerten von Urbain [86], Bruisten [87], Dunn [88] für SiO_2

Al_2O_3

Bei Al_2O_3 ist ein großer Unterschied zwischen Avramov- und Arrhenius-Ansatz zu erkennen (siehe Abbildung 6.10). Die Modellierung mit Hilfe des Arrhenius-Ansatzes stimmt ähnlich gut wie bei SiO_2 mit den experimentell ermittelten Viskositätswerten überein. Bei den mit dem Avramov-Ansatz bestimmten Viskositätswerten fällt auf, dass diese nicht so exakt mit den Experimenten übereinstimmen. Allerdings muss beachtet werden, dass bei Al_2O_3 nur Messwerte niedriger Viskositäten vorliegen. Der Schmelzpunkt von Al_2O_3 liegt zwar hoch, sobald es jedoch in der flüssigen Phase vorliegt, ist die Viskosität sehr niedrig. In diesen kleinen Viskositätsbereichen ist es schwierig, exakte Messergebnisse zu produzieren. Die BÄHR-Thermoanalyse GmbH gibt für ihr kommerzielles Hochtemperatur-Viskosimeter VIS403 beispielsweise einen Messbereich von $\ln(\eta) > 2,3$ Pas an.

Die Messungen von Urbain in Abbildung 6.11 zeigen für einen weiten Temperaturbereich nur einen leichten Abfall der Viskosität mit steigender Temperatur. Das Modell mit dem Arrhenius-Ansatz stellt diesen Viskositätsverlauf von Al_2O_3 exakt dar, wohingegen bei den Berechnungen des Avramov-Ansatzes die Linie der Messpunkte nur geschnitten wird.

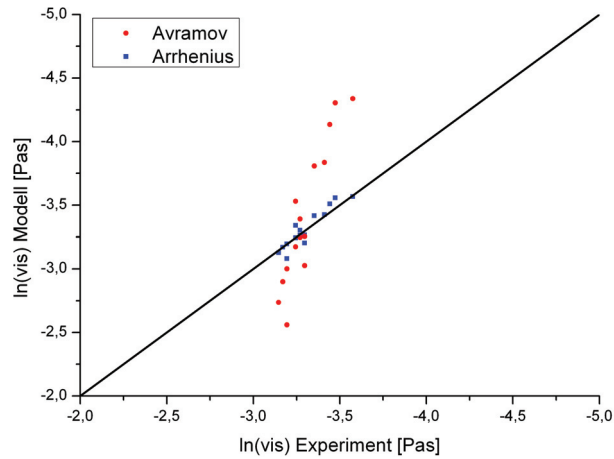


Abbildung 6.10.: $\ln(\eta)_{sim}-\ln(\eta)_{exp}$ -Diagramm von Al_2O_3

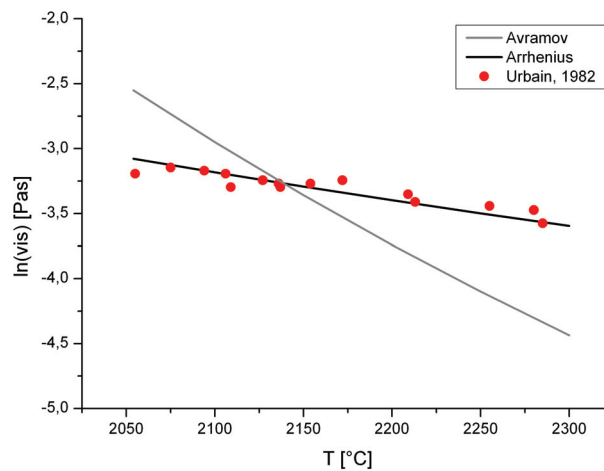


Abbildung 6.11.: Vergleich von Modellrechnungen mit Messwerten von Urbain (erhalten von A. Kondratiev) von Al_2O_3

$SiO_2-Al_2O_3$ System

Bei dem $SiO_2-Al_2O_3$ System zeigt sich abhängig vom Viskositätsbereich ein großer Unterschied zwischen Avramov- und Arrhenius-Ansatz (siehe Abbildung 6.12). Im niedrigen Viskositätsbe-

reich stimmen experimentell ermittelte und berechnete Werte besser beim Arrhenius-Modell überein. Im hohen Viskositätsbereich ist es genau umgekehrt. Hier sind die Modellierungen des Avramov-Ansatzes genauer.

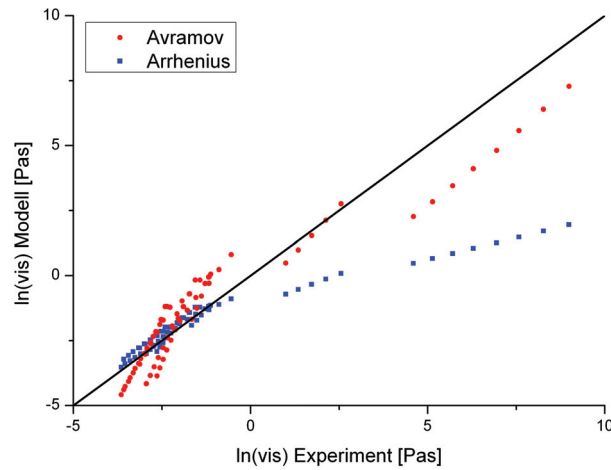


Abbildung 6.12.: $\ln(\eta)_{sim}-\ln(\eta)_{exp}$ -Diagramm des $SiO_2-Al_2O_3$ Systems

Ein Beispiel für niedrige Viskositäten ist in Abbildung 6.13 zu sehen. Die Viskosität ändert sich nur leicht mit steigender Temperatur, wie dies auch schon bei reinem Al_2O_3 der Fall war. Die mit dem Arrhenius-Modell berechneten Viskositätswerte liegen über den gesamten Temperaturbereich ca. 0,5 über den experimentellen Werten. Die Viskositätskurve des Avramov-Modells schneidet die kurve der Messwerte.

Der Viskositätsverlauf bei unterschiedlichen Systemzusammensetzungen ist in Abbildung 6.14 bei einer festen Temperatur von 2000 °C dargestellt. Im niedrigen Viskositätsbereich (hoher Al_2O_3 -Anteil) liegen die Arrhenius-Werte näher an den Messwerten als die Avramov-Werte. Zu höheren SiO_2 -Konzentrationen hin verhalten sich die beiden Ansätze genau umgekehrt. Der Avramov-Ansatz stellt den starken Anstieg der Viskosität besser dar, als der Arrhenius-Ansatz. Dieser Anstieg lässt sich auf den Lubricant Effekt zurückführen.

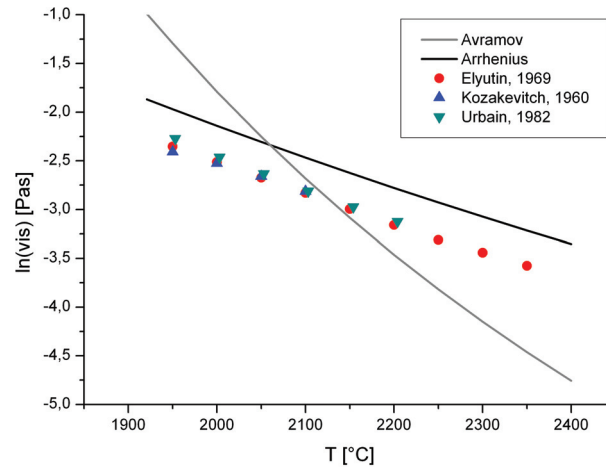


Abbildung 6.13.: Vergleich von Modellrechnungen mit Messwerten von Elyutin [89], Kosakevitch [90], Urbain [86] im $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ System mit $X_{\text{SiO}_2} = 30 \text{ mol\%}$, $X_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 70 \text{ mol\%}$

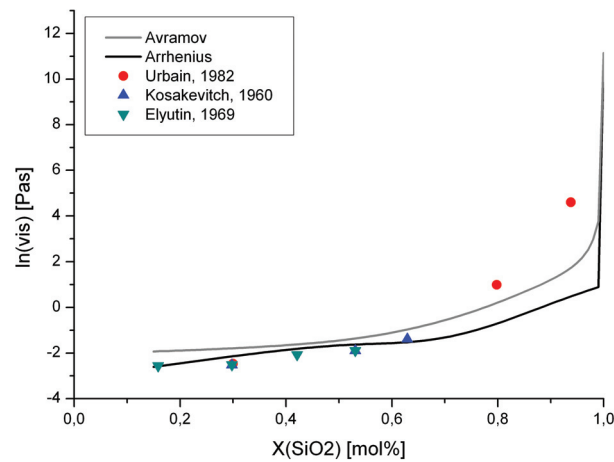


Abbildung 6.14.: Vergleich von Modellrechnungen mit Messwerten von Urbain [86], Kosakevitch [90], Elyutin [89] im $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ System bei 2000°C

SiO₂-Na₂O System

Bei diesem System gelingt im hohen Viskositätsbereich sowohl mit dem Avramov- als auch mit dem Arrhenius-Ansatz eine exakte Modellierung (siehe Abbildung 6.15). Bei niedrigen Viskositätswerten stimmt das Arrhenius-Modell besser mit den Messwerten überein als das Avramov-Modell.

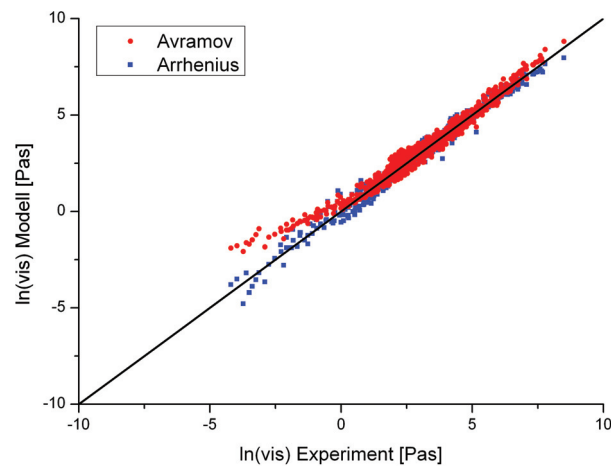


Abbildung 6.15.: $\ln(\eta)_{sim}-\ln(\eta)_{exp}$ -Diagramm des SiO_2-Na_2O Systems

In Abbildung 6.16 ist zu sehen, dass die Modellierung beider Modelle über einen weiten Temperaturbereich gut mit den Experimenten übereinstimmt.

Abbildung 6.17 ist ein weiteres Beispiel, in dem die Qualität des Modells im Binärsystem SiO₂-Al₂O₃ zu erkennen ist, wobei die Berechnung mit Hilfe des Arrhenius-Ansatzes hier genauere Ergebnisse liefert.

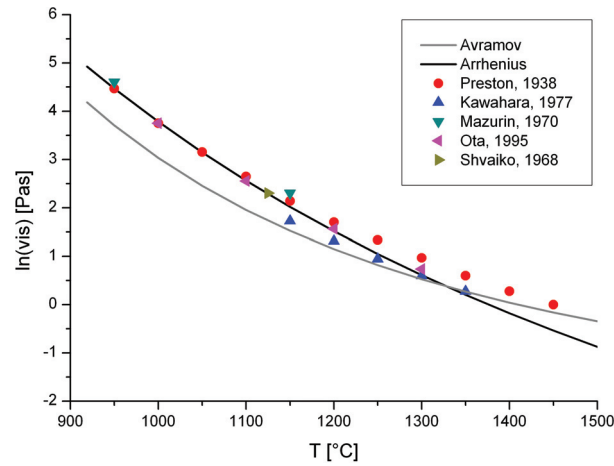


Abbildung 6.16.: Vergleich von Modellrechnungen mit Messwerten von Preston [91], Kawahara [92]/[93], Mazurin [94], Ota [95], Shvaiko [96]/[97]/[98] im $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ System mit $X_{\text{SiO}_2} = 60 \text{ mol\%}$, $X_{\text{Na}_2\text{O}} = 40 \text{ mol\%}$

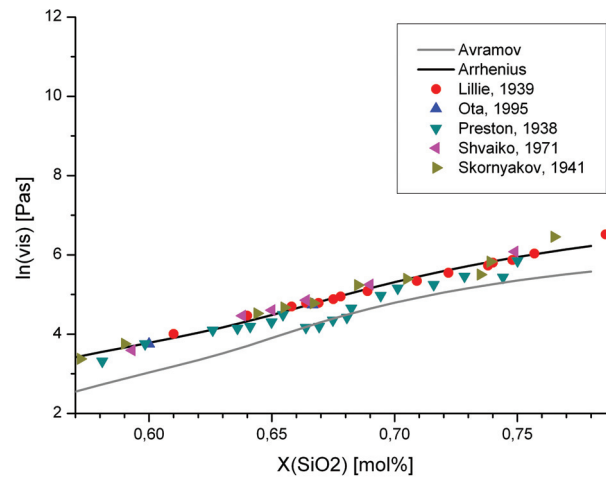


Abbildung 6.17.: Vergleich von Modellrechnungen mit Messwerten von Lillie [99], Ota [95], Preston [100]/[91], Shvaiko [101], Skornyakov [102]/[103] im $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ System bei $1000 \text{ }^\circ\text{C}$

SiO₂-K₂O System

Auch in diesem Binärsystem zeigt sich ein ähnliches Bild, wie in den beiden vorhergehenden Systemen. Abbildung 6.18 zeigt, dass sich im hohen Viskositätsbereich Avramov- und Arrhenius-Ansatz gleichermaßen eignen, um die Viskosität zu beschreiben. Bei niedrigen Viskositäten stimmen die Berechnungen des Arrhenius-Modells besser mit den gemessenen Werten überein, als die Modellierung mit Hilfe des Avramov-Ansatzes.

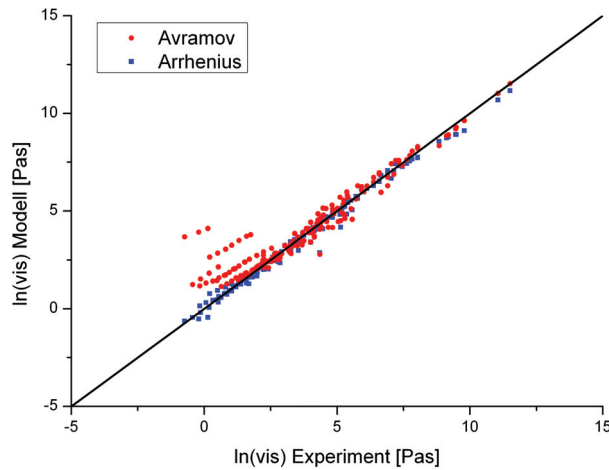


Abbildung 6.18.: $\ln(\eta)_{sim}-\ln(\eta)_{exp}$ -Diagramm des SiO₂-K₂O Systems

Dies zeigt sich auch in Abbildung 6.19. Der Arrhenius-Ansatz zeigt über den gesamten Zusammensetzungsbereich eine exakte Übereinstimmung mit den Experimenten. Auch der Abfall der Viskosität hin zu niedrigen SiO₂-Anteilen wird gut dargestellt. Die berechneten Werte des Avramov-Modells liegen für SiO₂ > 70 mol% unter den Messwerten und für kleinere SiO₂-Anteile darüber. Der Viskositätsabfall für kleine K₂O-Anteile lässt sich über das Assoziatenmodell und die Netzwerktheorie erklären. Bei der Betrachtung der Assoziatenverteilung im System SiO₂-K₂O bei 1400 °C (siehe Abbildung 6.20), ist zu erkennen, dass über ca. 75 mol% SiO₂ das reine SiO₂ dominiert. Dieses bildet die aus der Netzwerktheorie bekannte Schlackenstruktur aus (SiO₄)⁴⁻-Tetraedern und erhöht damit die Viskosität. Unter dieser Grenze beginnen die Assoziaten mit einem Verhältnis $\frac{X_{K_2O}}{X_{SiO_2}} \geq 1$ zu dominieren. K₂O wirkt als Netzwerkandler und die Viskosität nimmt entsprechend ab.

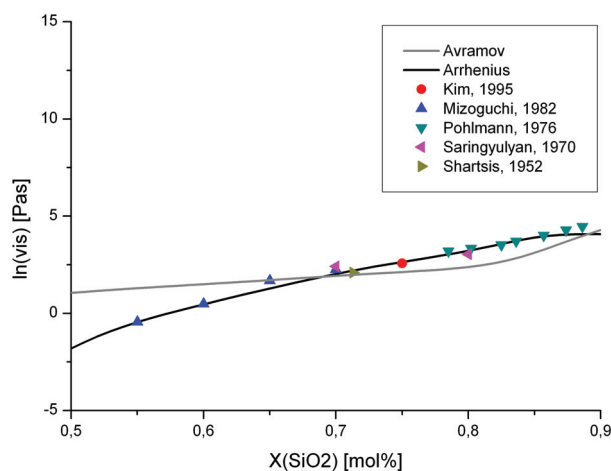


Abbildung 6.19.: Vergleich von Modellrechnungen mit Messwerten von Kim [104], Mizoguchi [105], Pohlmann [106], Saringyulyan [107], Shartsis [112] im $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ System bei $1400\text{ }^\circ\text{C}$

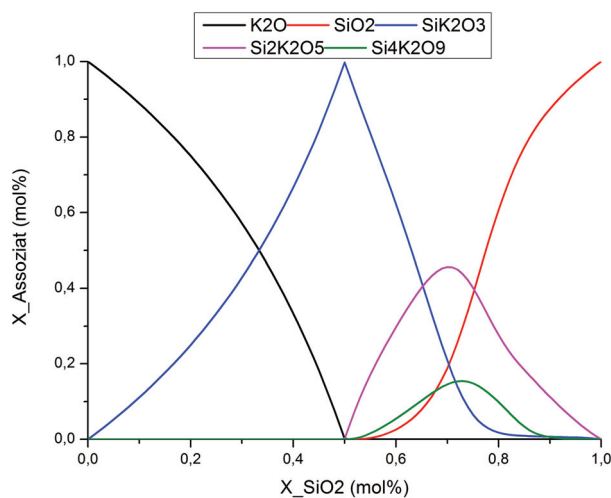


Abbildung 6.20.: Assoziatenverteilung im $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ System bei $1400\text{ }^\circ\text{C}$

Abbildung 6.21 dient als Beispiel für die Modellqualität über einen weiten Temperaturbereich und eine damit einhergehende Viskositätsänderung. Hier stimmen die Berechnungen des

Arrhenius-Ansatzes besser mit den Messwerten überein als die des Avramov-Ansatzes.

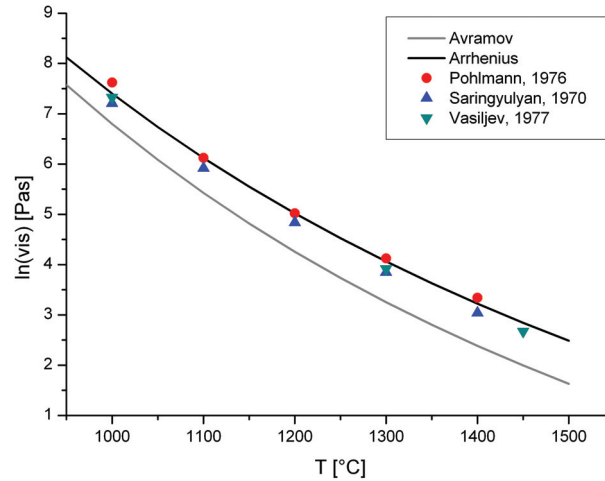


Abbildung 6.21.: Vergleich von Modellrechnungen mit Messwerten von Pohlmann [106], Saringyulyan [107][108][109][110][111], Vasiljev [113][114] im $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ System mit $X_{\text{SiO}_2} = 80 \text{ mol\%}$, $X_{\text{K}_2\text{O}} = 20 \text{ mol\%}$

$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ System

Bei diesem System liegen die mit dem Avramov-Ansatz berechneten Werte im gesamten Viskositätsbereich unterhalb der experimentell ermittelten Werte. Die mit dem Arrhenius-Ansatz modellierten Viskositätswerte liegen tendenziell über den gemessenen Werten (siehe Abbildung 6.22). Insbesondere im hohen Viskositätsbereich stimmen Modell und Experiment für diesen Ansatz jedoch gut überein. Insgesamt gelingt die Optimierung bei diesem Ternärsystem nicht so gut, wie bei den bisherigen Reinsubstanzen und Binärsystemen. Dies liegt hauptsächlich daran, dass es keine Messwerte im $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ System gibt, aus denen sich die Faktoren der binären $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ -Assoziat hätte bestimmen lassen. In diesem Fall müssen die Faktoren von vielen unterschiedlichen Assoziaten des $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ Systems parallel optimiert werden.

Die Abbildungen 6.23 und 6.24 zeigen, dass insbesondere das Arrhenius-Modell gut mit den Messwerten übereinstimmt. Die mit dem Avramov-Modell berechneten Werte sind, wie auch

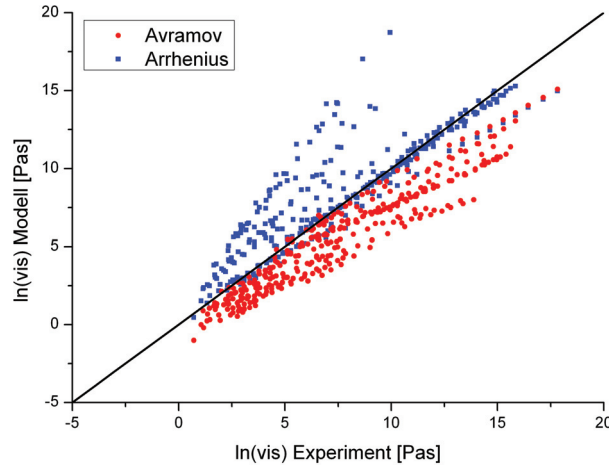


Abbildung 6.22.: $\ln(\eta)_{sim}-\ln(\eta)_{exp}$ -Diagramm des $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ Systems

schon im $\ln(\eta)_{sim}-\ln(\eta)_{exp}$ -Diagramm erkennbar, zu niedrig.

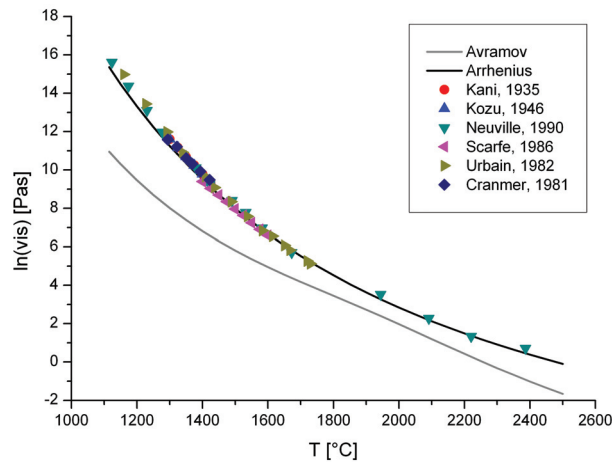


Abbildung 6.23.: Vergleich von Modellrechnungen mit Messwerten von Kani [115][116], Kozu [117], Neuville [118], Scarfe [119], Urbain [120], Cranmer [121] im $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ System mit $X_{\text{SiO}_2} = 75 \text{ mol\%}$, $X_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 12,5 \text{ mol\%}$, $X_{\text{Na}_2\text{O}} = 12,5 \text{ mol\%}$

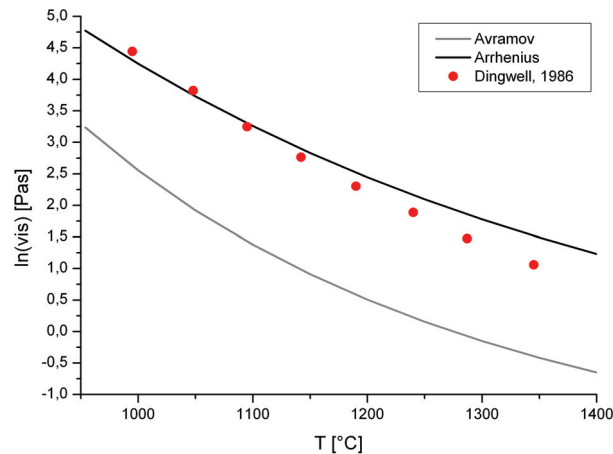


Abbildung 6.24.: Vergleich von Modellrechnungen mit Messwerten von Dingwell [122] im $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ System mit $X_{\text{SiO}_2} = 63,6 \text{ mol\%}$, $X_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1,7 \text{ mol\%}$, $X_{\text{Na}_2\text{O}} = 24,7 \text{ mol\%}$

$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ System

Bei diesem System zeigt sich für den Avramov-Ansatz der gleiche Effekt, wie beim vorhergehenden $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ System. Abbildung 6.25 zeigt den Vergleich zwischen Experiment und Berechnung für das $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ System. Die Viskositätswerte der Modellierung liegen tendenziell unter den Messergebnissen. Berechnungen mit dem Arrhenius-Ansatz streuen gleichmäßig um die Messwerte.

Abbildung 6.26 zeigt, dass bei dieser Zusammensetzung die berechneten und experimentell ermittelten Viskositätswerte nicht so genau wie in den Binärsystemen übereinstimmen. Die Berechnungen des Avramov-Ansatzes liegen hier über den gesamten Temperaturbereich unterhalb der Messungen. Die Viskositätskurve des Arrhenius-Ansatzes schneidet die Kurve der experimentellen Werte.

Abbildung 6.27 zeigt sowohl für den Avramov- als auch für den Arrhenius-Ansatz eine gute Übereinstimmung von Modell und Experiment. Die Werte des Avramov-Modells stimmen insbesondere bei hohen Viskositäten etwas besser als die Werte des Arrhenius-Modells mit den Experimentwerten überein.

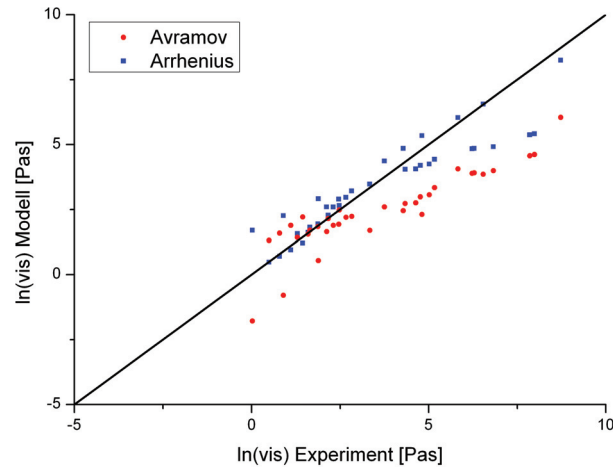


Abbildung 6.25.: $\ln(\eta)_{sim}-\ln(\eta)_{exp}$ -Diagramm des $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ Systems

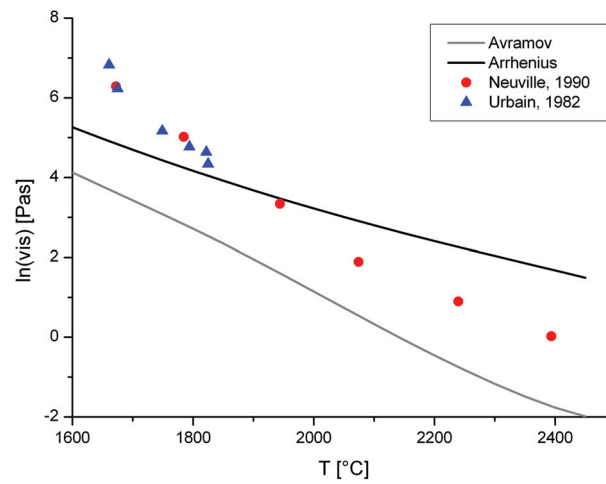


Abbildung 6.26.: Vergleich von Modellrechnungen mit Messwerten von Neuville [118], Urbain [120] im $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ System mit $X_{\text{SiO}_2} = 75 \text{ mol\%}$, $X_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 12,5 \text{ mol\%}$, $X_{\text{K}_2\text{O}} = 12,5 \text{ mol\%}$

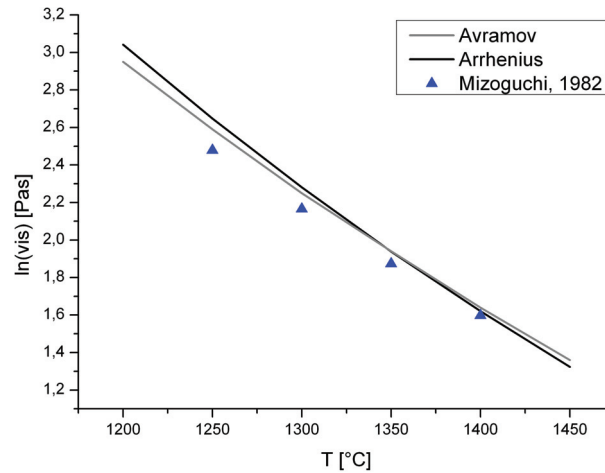


Abbildung 6.27.: Vergleich von Modellrechnungen mit Messwerten von Mizoguchi [123] im $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ System mit $X_{\text{SiO}_2} = 60,0 \text{ mol\%}$, $X_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 2,5 \text{ mol\%}$, $X_{\text{K}_2\text{O}} = 37,5 \text{ mol\%}$

$\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ System

Wie in Abbildung 6.28 zu erkennen ist, gelingt die Modellierung im $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ System deutlich besser als in den anderen Ternärsystemen. Da es in den beiden Binärsystemen $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ und $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ genügend Messpunkte gibt, können die Faktoren der binären Alkalioxid-SiO₂-Assoziate entsprechend gut optimiert werden. Im $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ System müssen nur die Faktoren der ternären Alkalioxid-SiO₂-Assoziate optimiert werden. Avramov- und Arrhenius-Ansatz liefern ähnliche Ergebnisse.

Abbildung 6.29 zeigt, dass die Modellierung des Avramov-Ansatzes unterhalb der Messwerte liegt. Die Ergebnisse des Arrhenius-Modells stimmen gut mit den Messwerten überein. Hier muss beachtet werden, dass die Messergebnisse von Sasek und Vasilijev nicht exakt übereinstimmen. Es lässt sich jedoch keine Aussage treffen, welche Ergebnisse der Realität entsprechen.

Die in Abbildung 6.30 dargestellten Modellierungsergebnisse zeigen insbesondere für den Arrhenius-Ansatz eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment. Tendenziell liegen die Werte des Arrhenius-Modells insbesondere bei großen Viskositäten leicht über den Messwer-

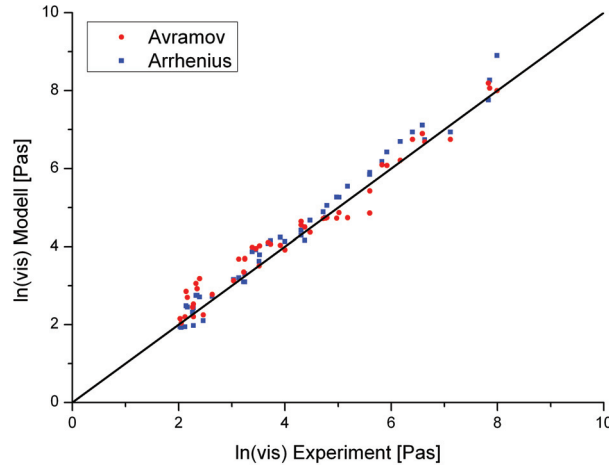


Abbildung 6.28.: $\ln(\eta)_{sim}-\ln(\eta)_{exp}$ -Diagramm des $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ Systems

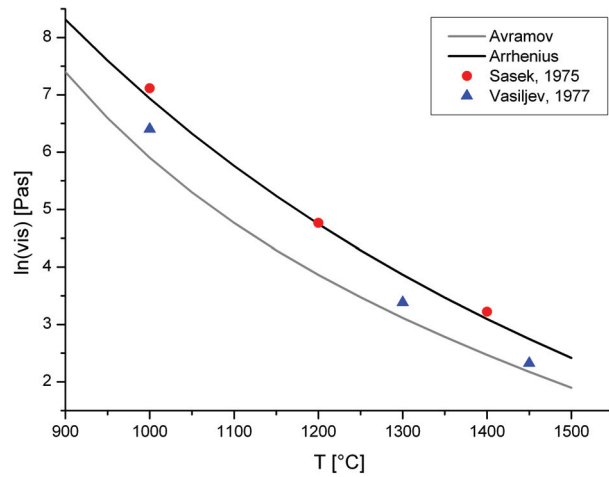


Abbildung 6.29.: Vergleich von Modellrechnungen mit Messwerten von Sasek [124][125][126], Vasiljev [113][114] im $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ System mit $X_{\text{SiO}_2} = 80 \text{ mol\%}$, $X_{\text{Na}_2\text{O}} = 10 \text{ mol\%}$, $X_{\text{K}_2\text{O}} = 10 \text{ mol\%}$

ten. Der Avramov-Ansatz liefert vom Kurvenverlauf her ebenfalls korrekte Berechnungen. Die berechneten Werte sind jedoch über den gesamten Temperaturbereich zu niedrig. Für kleiner werdende Temperaturen nimmt die Differenz zwischen Avramov-Modell und Experiment zu.

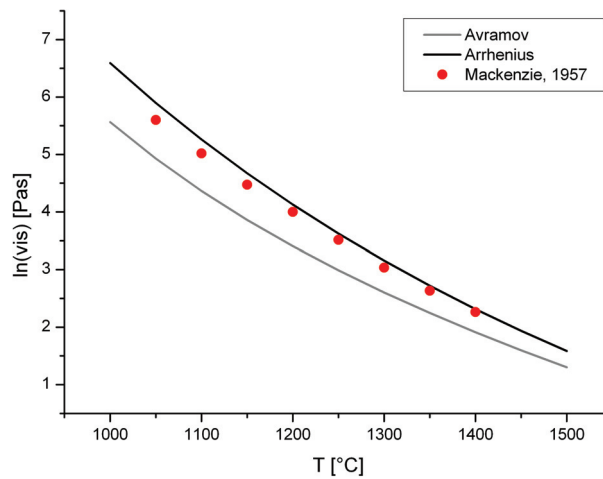


Abbildung 6.30.: Vergleich von Modellrechnungen mit Messwerten von Mackenzie [127] im SiO_2 - Na_2O - K_2O System mit $X_{\text{SiO}_2} = 74,3 \text{ mol\%}$, $X_{\text{Na}_2\text{O}} = 7,2 \text{ mol\%}$, $X_{\text{K}_2\text{O}} = 18,5 \text{ mol\%}$

SiO_2 - Al_2O_3 - Na_2O - K_2O System

Im Gesamtsystem gibt es keine zusätzlichen Assoziat, die alle vier Elemente enthalten. Die Qualität leitet sich hier nur aus der Qualität der vorher in den Untersystemen bestimmten Faktoren ab. Abbildung 6.31 zeigt, dass die mit Hilfe des Avramov-Ansatzes berechneten Werte unterhalb der Messwerte liegen. Das Arrhenius-Modell streut sowohl nach oben als auch nach unten. Oberhalb und unterhalb der Messwerte liegen jeweils ca. 40 % der berechneten Werte. Bei den restlichen 20 % stimmen Experiment und Arrhenius-Modell sehr gut überein.

Abbildung 6.32 zeigt als Beispiel eine Zusammensetzung des Vierstoffsystems über einen weiten Temperaturbereich. Hier ist zu erkennen, dass die modellierten Viskositätswerte des Avramov-Ansatzes im Vergleich zum Experiment über den gesamten Temperaturbereich deutlich zu niedrig sind. Das Arrhenius-Modell stimmt gut mit den Messergebnissen überein. Insbesondere bei Viskositäten $\eta > 6$ ist die Modellierung sehr genau. Für kleinere Viskositätswerte

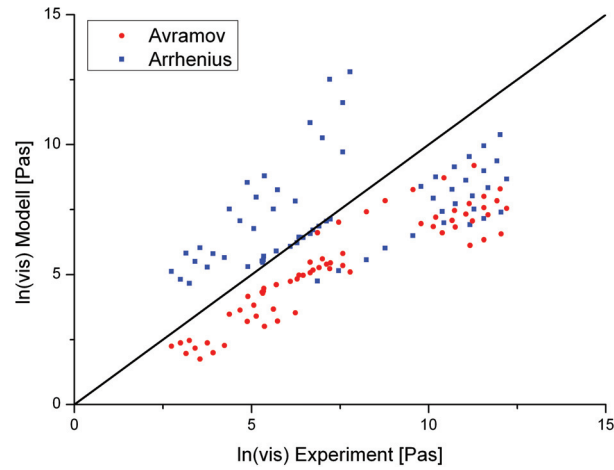


Abbildung 6.31.: $\ln(\eta)_{sim}-\ln(\eta)_{exp}$ -Diagramm des $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ Systems

scheinen die Arrhenius-Berechnungen etwas zu hoch zu sein.

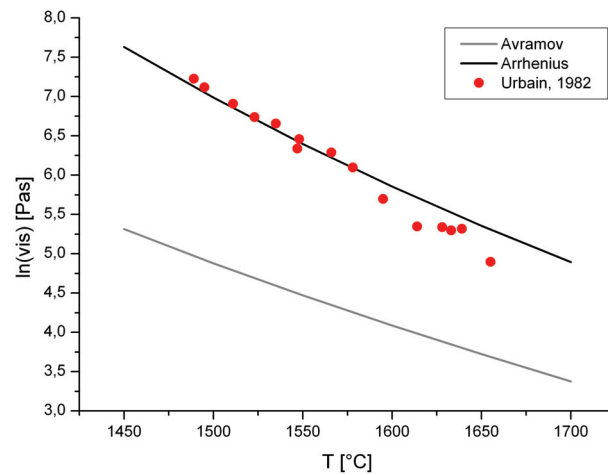


Abbildung 6.32.: Vergleich von Modellrechnungen mit Messwerten von Urbain [120] im $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ System mit $X_{\text{SiO}_2} = 68,8 \text{ mol\%}$, $X_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 15,6 \text{ mol\%}$, $X_{\text{Na}_2\text{O}} = 10,8 \text{ mol\%}$, $X_{\text{K}_2\text{O}} = 4,8 \text{ mol\%}$

6.5. Vergleich des neuen Modells mit bereits in der Literatur vorhandenen Modellen

An dieser Stelle wird das neu entwickelte Modell mit bereits in der Literatur vorhandenen Modellen (siehe Kapitel 2.3.2 ab Seite 34) verglichen. Hierzu werden die unterschiedlichen $\ln(\eta)_{\text{sim}} - \ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramme herangezogen. Das neu entwickelte Modell wird mit dem Shaw-Modell (1972), dem Lakatos-Modell (1972), dem Urbain-Modell (1981) und dem Kalmanovitch-Frank-Modell (1988) verglichen. Ergebnisse des Riboud-Modells (1981) und des Streeter-Modells (1984) werden nicht verglichen, da diese beiden Modelle von den Autoren nur für einen eingeschränkten Zusammensetzungsbereich vorgesehen sind. Das Bottinga-Weill-Modell (1972) ist neben der Einschränkung der Zusammensetzung zusätzlich nur für spezielle Temperaturbereiche zu verwenden und wird daher ebenfalls nicht berücksichtigt.

SiO₂

Bei SiO₂ sind mit dem Shaw-Modell, dem Urbain-Modell und dem Kalmanovitch-Frank-Modell keine Modellierungen möglich. Abbildung 6.33 zeigt die $\ln(\eta)_{\text{sim}} - \ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramme der restlichen Modelle für das SiO₂ System. Mit dem Lakatos-Modell lassen sich Viskositätswerte für reines SiO₂ berechnen, jedoch liegen die modellierten Werte weit von den experimentellen Werten entfernt und sind deutlich zu niedrig. Das neu entwickelte Modell liefert für SiO₂ eine gute Übereinstimmung von berechneten und experimentell ermittelten Viskositätswerten. Dabei ist zwischen dem Avramov- und dem Arrhenius-Ansatz kein Unterschied erkennbar.

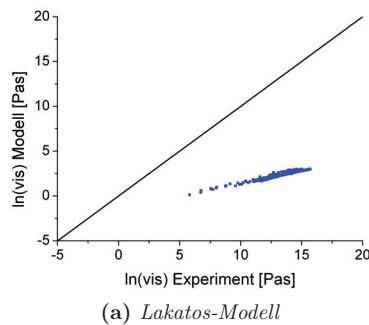


Abbildung 6.33.: Vergleich der unterschiedlichen Modelle für SiO₂

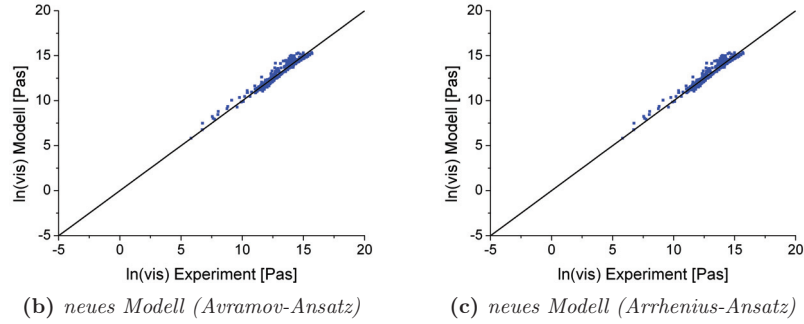


Abbildung 6.33.: Vergleich der unterschiedlichen Modelle für SiO_2

Al_2O_3

Mit dem Lakatos-Modell sind keine Modellierungen möglich. Abbildung 6.34 zeigt die $\ln(\eta)_{\text{sim}}$ - $\ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramme der restlichen Modelle für Al_2O_3 . Die Berechnungen des Shaw Modells sind viel zu niedrig. Die Modellierung mit dem Urbain- und dem Kalmanovitch-Frank-Modell gelingt besser. Die Viskositätswerte sind aber immer noch zu niedrig, wobei das Urbain-Modell näher an den Messwerten liegt. Die berechneten Viskositäten des Avramov-Ansatzes liegen zu gleichen Anteilen oberhalb und unterhalb der experimentell ermittelten Werte. Der Arrhenius-Ansatz liefert für Al_2O_3 die mit Abstand beste Übereinstimmung von Modell und Experiment.

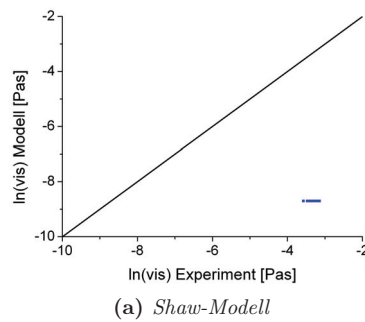


Abbildung 6.34.: Vergleich der unterschiedlichen Modelle für Al_2O_3

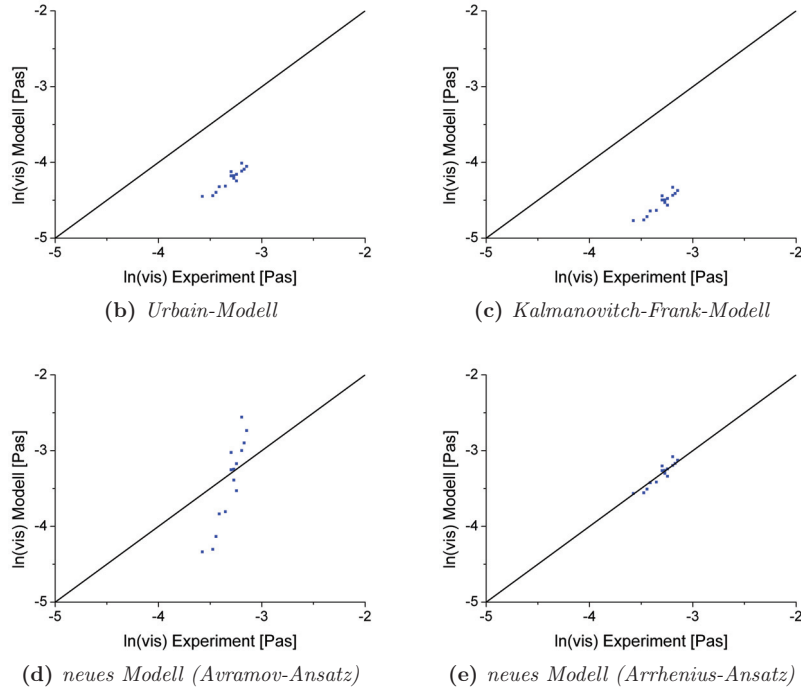


Abbildung 6.34.: Vergleich der unterschiedlichen Modelle für Al_2O_3

$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ System

Abbildung 6.35 zeigt die $\ln(\eta)_{\text{sim}} - \ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramme der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ System. Hier sind die Modellierungsergebnisse vom Urbain-Modell am genauesten. Die Berechnungen stimmen über den gesamten Viskositätsbereich mit den Experimenten überein. Die Genauigkeit der Modellierung nimmt mit höheren Viskositätswerten etwas ab. Die berechneten Viskositäten beim Kalmanovitch-Frank-Modell zeigen ähnlich gute Ergebnisse. Sie liegen aber über den gesamten Bereich tendenziell unterhalb der experimentell ermittelten Werte. Beim Shaw-Modell weichen die Modellierungen im niedrigen Viskositätsbereich nach unten hin ab und im hohen Viskositätsbereich nach oben hin. Die Berechnungen des Lakatos-Modells weichen stark von den gemessenen Werten ab. Beim Avramov-Ansatz des neuen Modells stimmen Berechnung und Experiment im hohen Viskositätsbereich besser überein

als bei niedrigen Viskositäten. Ein umgekehrtes Bild zeigt sich beim Arrhenius-Ansatz. Hier stimmt die Modellierung im niedrigen Viskositätsbereich gut mit den Experimenten überein. Je größer die Viskosität wird, desto stärker weicht das Modell von den Messungen ab.

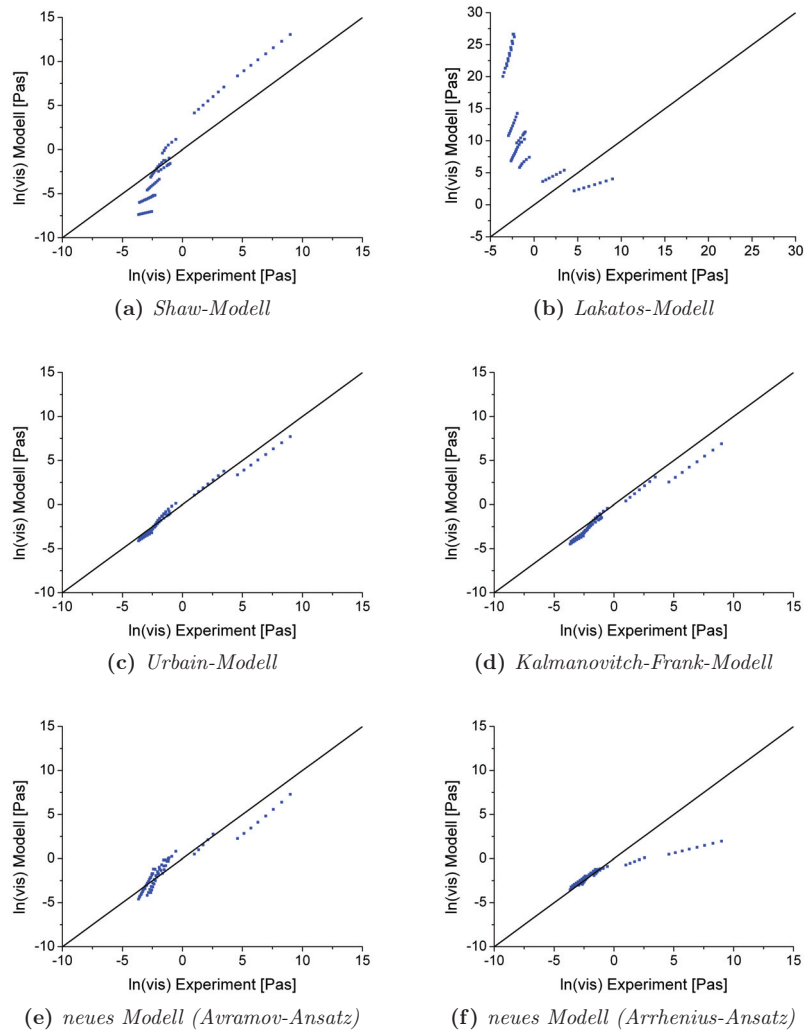


Abbildung 6.35.: Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ System

SiO₂-Na₂O System

Abbildung 6.36 zeigt die $\ln(\eta)_{\text{sim}} - \ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramme der unterschiedlichen Modelle für das SiO₂-Na₂O System. Beim Shaw-Modell sind die berechneten Werte tendenziell zu niedrig. Die Modellierung stimmt besser im niedrigen Viskositätsbereich mit den Experimenten überein als im hohen Bereich. Die Ergebnisse des Lakatos-Modells streuen stärker als beim Shaw-Modell. Die tendenz von zu niedrig berechneten Viskositäten ist aber auch hier erkennbar. Urbain- und Kalmanovitch-Frank-Modell weichen insbesondere bei hohen Viskositäten weit von den Messwerten ab. Über den gesamten Viskositätsbereich sind die berechneten Werte bei diesen beiden Modellen zu hoch. Die Ergebnisse des Kalmanovitch-Frank-Modells sind etwas genauer, als die von Urbain. Die besten Ergebnisse liefert der Arrhenius-Ansatz des neuen Modells. Über den gesamten Viskositätsbereich stimmen Experiment und Modell gut überein. Der Avramov-Ansatz zeigt im hohen Viskositätsbereich ähnlich gute Ergebnisse. Im niedrigen Viskositätsbereich ist eine größere Abweichung von den experimentellen Daten zu erkennen. Hier sind die berechneten Werte tendenziell zu hoch.

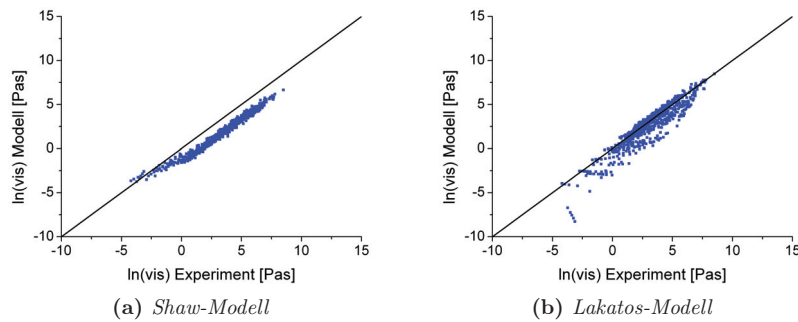


Abbildung 6.36.: Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das SiO₂-Na₂O System

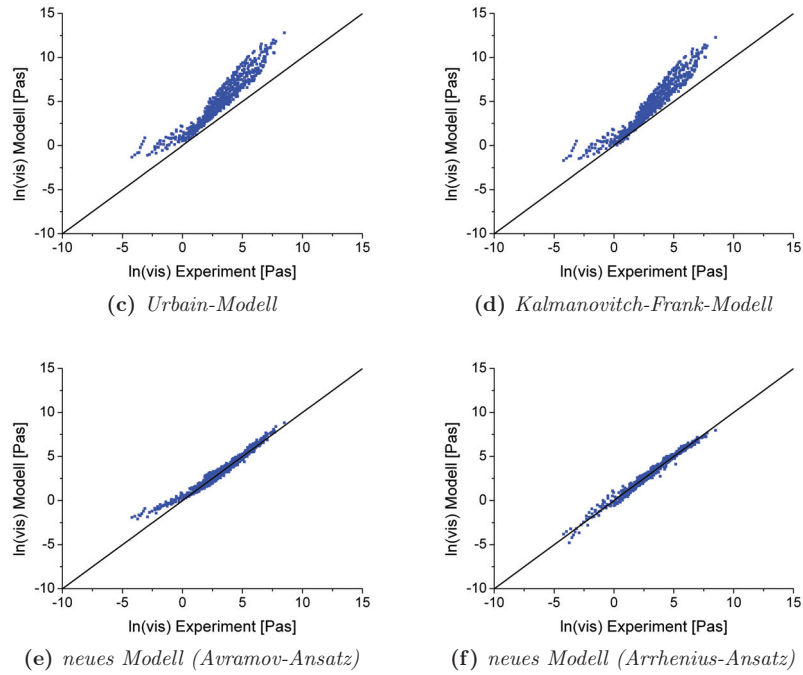


Abbildung 6.36.: Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ System

$\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ System

Abbildung 6.37 zeigt die $\ln(\eta)_{\text{sim}}\text{-}\ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramme der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ System. Der Arrhenius-Ansatz des neuen Modells zeigt zusammen mit dem Lakatos-Modell gute Berechnungsergebnisse über den gesamten Viskositätsbereich, wobei die modellierten Werte beim Lakatos-Modell etwas zu groß sind. Beim Avramov-Ansatz streuen die Werte im hohen Viskositätsbereich stärker. Im niedrigen Viskositätsbereich sind die berechneten Viskositäten zu groß. Beim Shaw-Modell sind die berechneten Viskositätswerte über den gesamten Bereich hinweg zu niedrig. Urbain- und Kalmanovitch-Frank-Modell weichen im hohen Viskositätsbereich nach oben hin ab. Im niedrigen Viskositätsbereich sind die Ergebnisse besser. Beim direkten Vergleich stimmt die Modellierung des Kalmanovitch-Frank-Modells besser mit den Experimenten überein als die des Urbain-Modells.

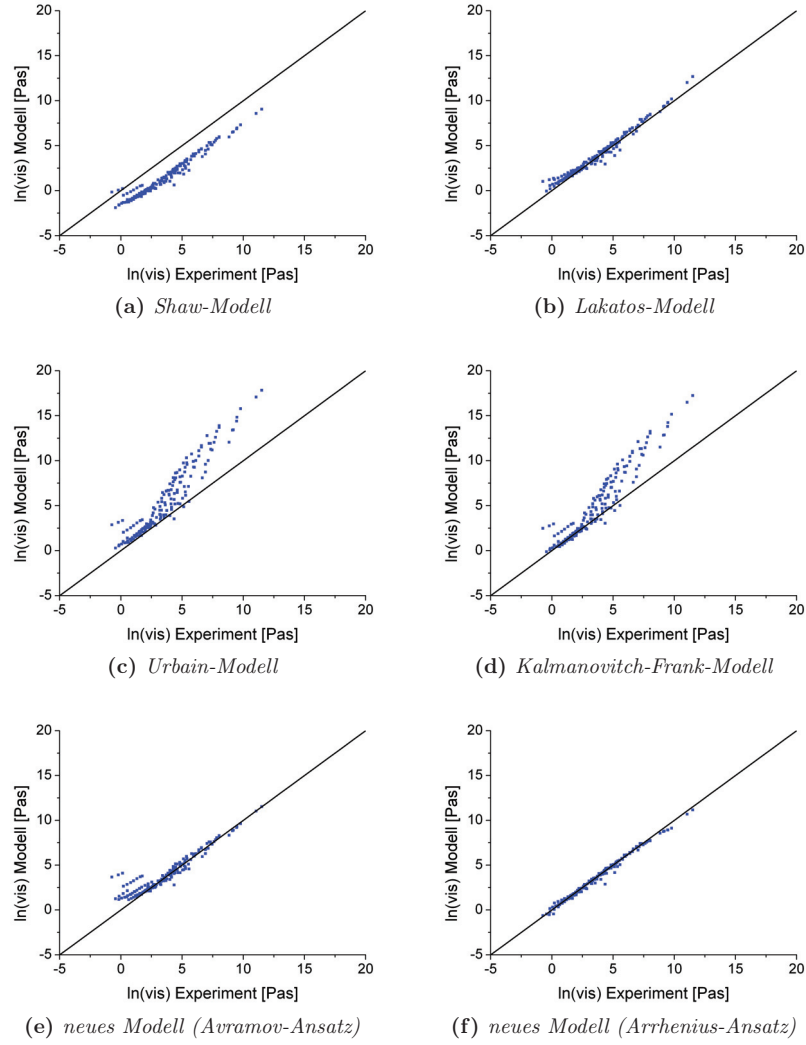


Abbildung 6.37.: Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ System

SiO₂-Al₂O₃-Na₂O System

Abbildung 6.38 zeigt die $\ln(\eta)_{\text{sim}} - \ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramme der unterschiedlichen Modelle für das SiO₂-Al₂O₃-Na₂O System. Bei diesem Ternärsystem sind bei allen Modellen Differenzen zwischen den berechneten und den experimentell ermittelten Werten zu sehen. Auch ist die Streuung deutlich größer als noch bei den Binärsystemen. Die Modellierung des Avramov-Ansatzes liegt über den gesamten Viskositätsbereich unterhalb der Experimente. Ähnliches zeigt sich in weniger stark ausgeprägter Form beim Shaw-Modell. Auch das Lakatos-Modell weicht gerade im hohen Viskositätsbereich stark nach unten hin ab. Urbain- und Kalmanovitch-Frank-Modell streuen mit den berechneten Werten sowohl nach oben als auch nach unten. Der Arrhenius-Ansatz des neuen Modells zeigt ebenfalls eine starke Streuung. Bei ihm liegen die berechneten Werte jedoch tendenziell über den Messwerten.

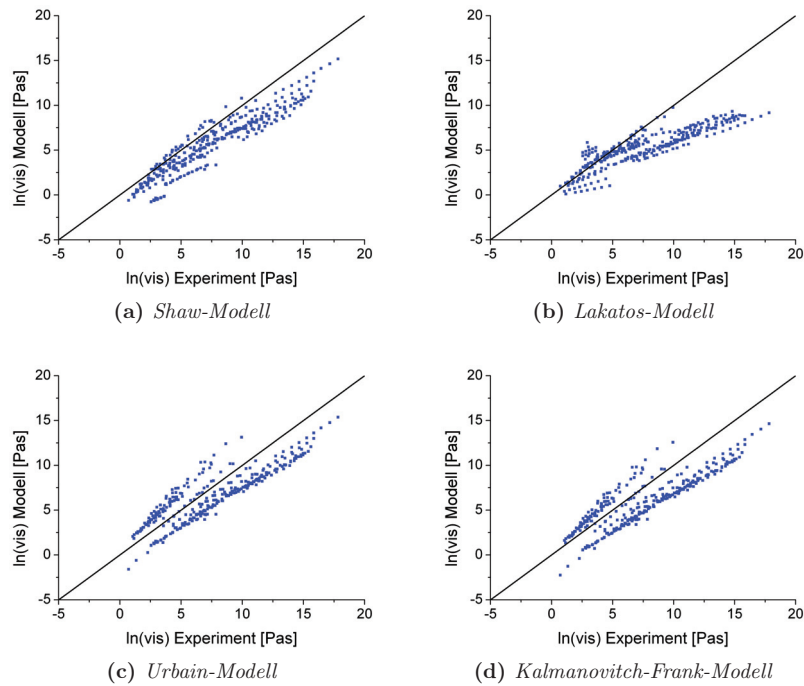


Abbildung 6.38.: Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das SiO₂-Al₂O₃-Na₂O System

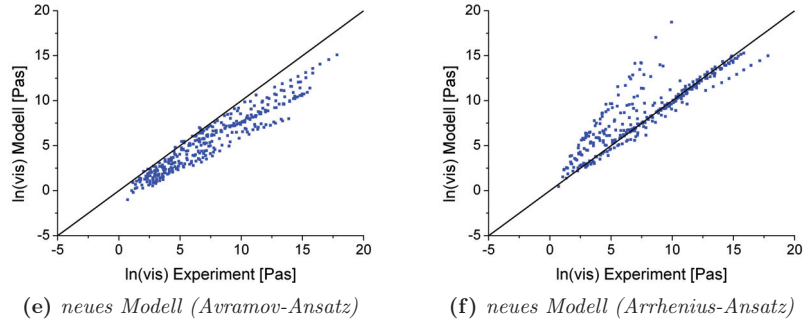


Abbildung 6.38.: Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ System

$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ System

Abbildung 6.39 zeigt die $\ln(\eta)_{\text{sim}}\text{-}\ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramme der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ System. Tendenziell liegen die berechneten Werte aller Modelle zu niedrig. Die berechneten Werte des Shaw-Modells weichen über den gesamten Viskositätsbereich nach unten hin ab. Das Lakatos-Modell zeigt bei niedrigen Viskositäten eine gute Übereinkunft von Modellierung und Experiment. Im hohen Viskositätsbereich weicht es aber ebenfalls nach unten hin ab. Urbain und Kalmanovitch-Frank liefern sehr ähnliche Ergebnisse, wobei das Urbain-Modell etwas genauer ist. Bei etwa der Hälfte der Messpunkte stimmen hier Modell und Experiment gut überein. Die andere Hälfte liegt unterhalb der gemessenen Werte. Bei dem neu entwickelten Modell stimmen die Berechnungen des Arrhenius-Ansatzes besser mit den experimentell ermittelten Viskositäten überein als beim Avramov-Ansatz.

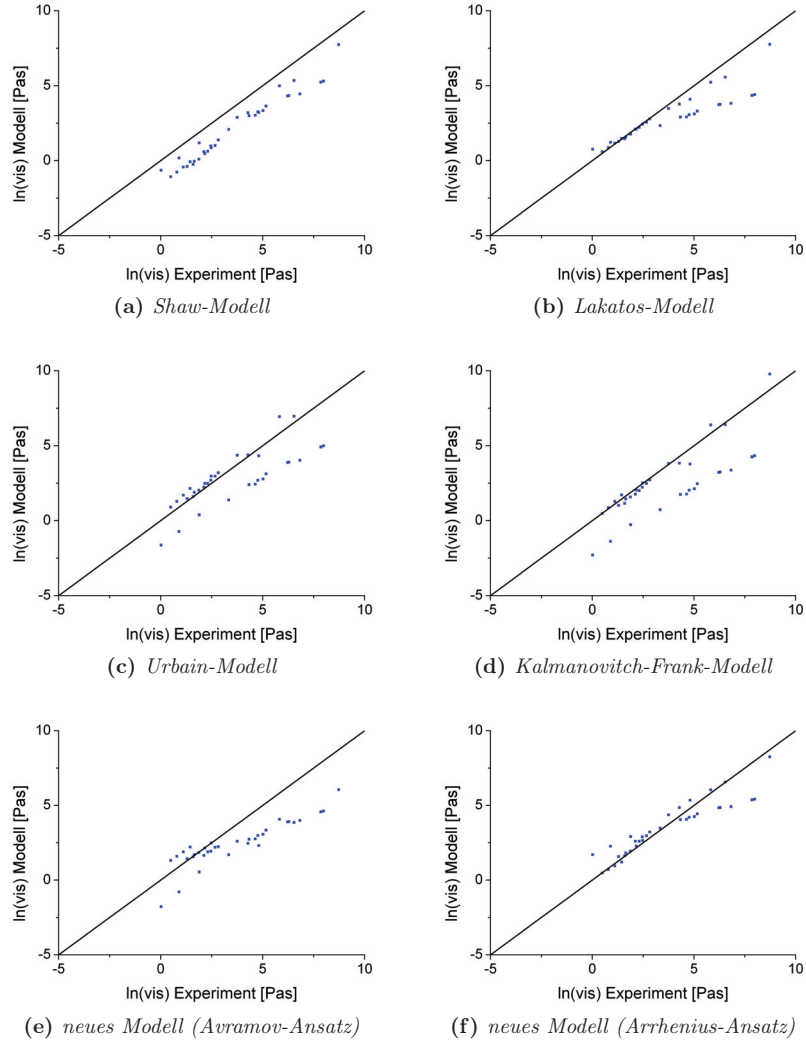


Abbildung 6.39.: Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ System

SiO₂-Na₂O-K₂O System

Abbildung 6.40 zeigt die $\ln(\eta)_{\text{sim}} - \ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramme der unterschiedlichen Modelle für das SiO₂-Na₂O-K₂O System. Hier stimmen die Berechnungen des neuen Modells am besten mit den Experimenten überein. Avramov- und Arrhenius-Ansatz unterscheiden sich in ihren Ergebnissen kaum voneinander. Ähnlich gute Ergebnisse liefert das Lakatos-Modell, jedoch mit einer breiteren Streuung. Die Werte im Shaw-Modell weichen durchgehend zu weit nach unten hin ab. Urbain- und Kalmanovitch-Frank-Modell weichen stark nach oben hin ab, wobei Kalmanovitch-Frank die etwas genaueren Berechnungen liefert als Urbain.

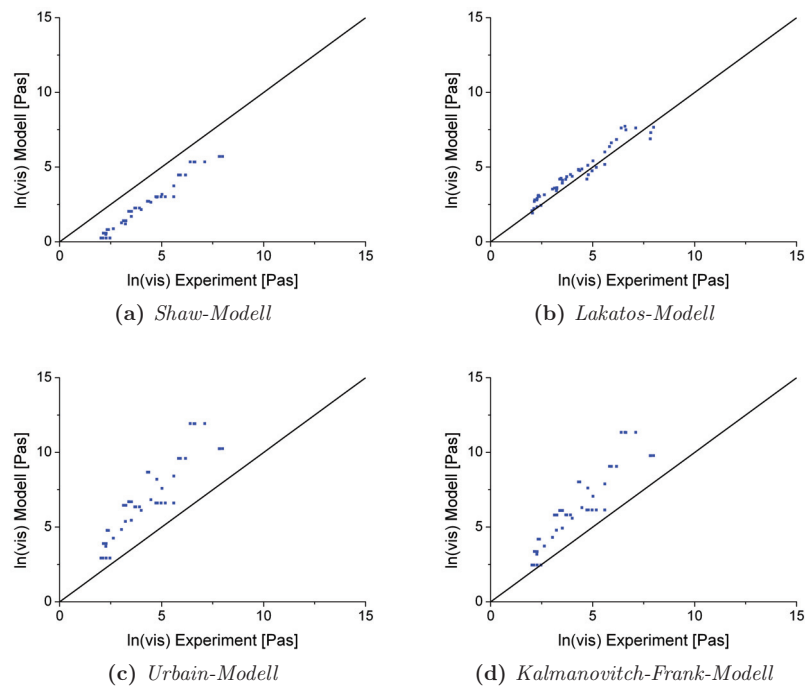


Abbildung 6.40.: Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das SiO₂-Na₂O-K₂O System

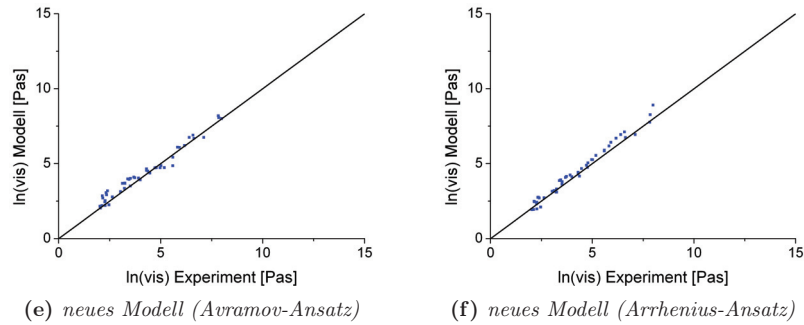


Abbildung 6.40.: Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ System

$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ System

Abbildung 6.41 zeigt die $\ln(\eta)_{\text{sim}}\text{-}\ln(\eta)_{\text{exp}}$ -Diagramme der unterschiedlichen Modelle für das Gesamtsystem $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$. Bei diesem System weichen alle Modelle stark von den Experimenten ab. Der Avramov-Ansatz des neue Modells zeigt dabei eine Abweichung nach unten hin. Beim Arrhenius-Ansatz stimmt ein Teil der modellierten Punkte (ca. 20 %) sehr gut mit den Experimenten überein. Die restlichen Punkte verteilen sich gleichmäßig in zu hoch und zu niedrig berechnete Werte. Tendenziell nimmt die Qualität der Modellierung bei beiden Ansätzen mit steigender Viskosität ab. Beim Shaw-Modell ist über den gesamten Viskositätsbereich eine nahezu gleichmäßige, jedoch zu niedrige Berechnung zu erkennen. Das Lakatos-Modell weicht mit seinen Berechnungen mit steigender Viskosität immer weiter von den gemessenen Viskositätswerten ab. Urbain- und Kalmanovitch-Frank-Modell streuen in beide Richtungen. Urbain liefert etwas bessere Werte als Kalmanovitch-Frank. Alle Modelle weichen im hohen Viskositätsbereich stärker ab als im niedrigen Viskositätsbereich.

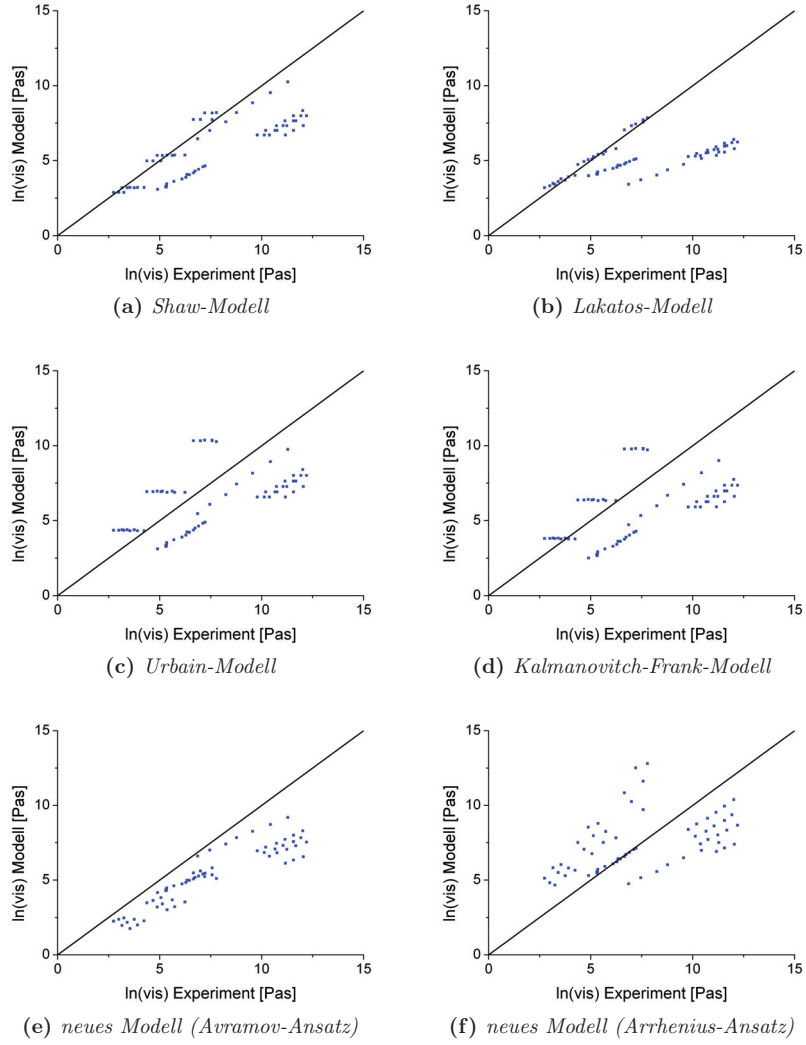


Abbildung 6.41.: Vergleich der unterschiedlichen Modelle für das $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ System

7. Zusammenfassung und Ausblick

7.1. Entwicklung und Aufbau des Hochtemperatur-Hochdruck-Viskosimeters

Der Messstand wurde erfolgreich aufgebaut und eine passende Steuersoftware in LabVIEW programmiert. Für erste Tests wurden Messungen mit Silikonölen durchgeführt. Hier konnten bereits so viele Erkenntnisse in der Handhabung gesammelt werden, dass im nächsten Schritt erste Modifizierungen am Aufbau vorgenommen werden konnten. Bei der Magnetkupplung wurden die klassischen Kugellager durch keramische Lager ersetzt. Hierdurch konnte das Grunddrehmoment deutlich herabgesetzt werden, wodurch mehr Drehmoment für die eigentliche Messung zur Verfügung steht. Auch wurden Teile der Isolierung, an denen der Rührkörper geschliffen hat, so verändert, dass das Schleifen und damit einhergehende Messungenauigkeiten minimiert werden.

Mit einem Standardglas bekannter Viskosität konnte das neue Viskosimeter dann kalibriert werden. Ein weiteres Standardglas diente für eine erste Referenzmessung, um den Fehler abzuschätzen. Mit dem Hochtemperatur-Hochdruck-Viskosimeter sind Viskositätsmessungen mit einem Fehler von 8 % im hohen Viskositätsbereich ($\ln(\eta) > 3,5$) und 15 % im niedrigen Viskositätsbereich ($\ln(\eta) < 3,5$) möglich.

Während der Phase des Aufbaus und den ersten Testmessungen sind einige Punkte aufgefallen, die beim Aufbau eines weiteren Viskosimeters unbedingt zu beachten sind. Die Verbindung zwischen Rheometer und Magnetkupplung kann auf einfache Weise stabilisiert werden. Durch kleine Änderungen am Druckbehälter kann die Anzahl unterschiedlicher Ersatzteile im Bereich der O-Ringe und Thermoelemente reduziert werden. Des Weiteren kann über den Einsatz anderer Strom und Thermoelementdurchführungen auf Spezialanfertigungen verzichtet und statt dessen auf Lagerware zurückgegriffen werden. Schließlich kann durch eine Ände-

rung des Ofenrohrs und der Gasversorgung der Reaktionsraum von dem Heizelementerraum getrennt werden, wodurch die Heizelemente geschont werden. Alle diese Veränderungen haben eine höhere Benutzerfreundlichkeit und niedrigere Kosten zur Folge. Außerdem ergeben sich Möglichkeiten, unter ganz neuen Bedingungen Messungen durchzuführen.

7.2. Messung realer Schlackesysteme

Um die Funktionsfähigkeit der neuen Anlage zu demonstrieren, wurden Messungen an vier realen Schlackesystemen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass Druckänderungen bis zu 7 bar keinen messbaren Einfluss auf die Viskosität der Schlacke haben. Auch zwischen reduzierenden und inerten Atmosphären ist kein Viskositätsunterschied messbar.

Vergleiche der Messergebnisse mit vorhandenen Modellen haben gezeigt, dass es sinnvoll ist, ein neues Modell für die Modellierung von Viskositäten zu entwickeln. Mit Hilfe der bekannten Arrhenius und Weymann Gleichungen, die für die vier Schlacken ebenfalls bestimmt wurden, ist zwar in gewissem Maße eine Berechnung der Viskosität möglich, jedoch werden für die Faktorbestimmung zunächst Viskositätsmessergebnisse der zu berechnenden Schlacken benötigt. Diese Modelle ermöglichen also eine Extrapolation über einen bereits gemessenen Viskositätsbereich hinaus, aber keine Vorhersagen.

Beim Vergleich der gemessenen Viskositäten mit der Basizität der jeweiligen Schlacken konnte gezeigt werden, dass die Viskosität mit steigender Basizität abnimmt. Dieses Phänomen lässt sich über die Netzwerktheorie erklären, da eine hohe Basizität für einen hohen Netzwerkwandleranteil innerhalb der Schlacke steht. Diese Netzwerkwandler verringern durch ein Aufbrechen der Schlackenstruktur die Viskosität.

7.3. Entwicklung des Modells für Viskositätsberechnungen

Zunächst muss bei dem neuen Modell zwischen den beiden unterschiedlichen mathematischen Beschreibungen unterschieden werden. Werden alle Ergebnisse betrachtet, so eignet sich der Arrhenius-Ansatz besser für die Modellierung von Viskositäten von Schlacken in der Vollschmelze. Werden in der Zukunft auch Viskositäten mehrphasiger Systeme modelliert, kann

der Avramov-Ansatz durchaus bessere Ergebnisse liefern, weshalb er bei der Weiterentwicklung des Modells mit einbezogen werden muss.

Insbesondere bei SiO_2 , Al_2O_3 und den Binärsystemen stimmen die Berechnungen sehr gut mit den experimentellen Ergebnissen überein.

Bei den Ternärsystemen konnte gezeigt werden, dass die Qualität sehr stark davon abhängt, ob möglichst wenig Assoziatenfaktoren bestimmt werden müssen. Da es zu den Systemen $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ und $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ keine experimentellen Daten gibt, können auch die Faktoren der entsprechenden Assoziat nicht mit Hilfe dieser Systeme optimiert werden. Die Optimierung erfolgt daher über die Messdaten der Systeme $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ und $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ gleichzeitig mit den in diesen Systemen existierenden Assoziaten. Darunter leidet die Modellqualität dieser beiden Ternärsysteme deutlich sichtbar. Am $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ System zeigt sich, dass das Modell auch für Ternärsysteme bei entsprechenden Voraussetzungen sehr gute Modellierungsergebnisse liefern kann. Bei diesem System werden nur die entsprechenden ternären Assoziat optimiert, da die Optimierung der binären Assoziat bereits in den Systemen $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ und $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ erfolgen kann.

Für das Vierstoffsystem gibt es keine eigenen Assoziat. Werden einzelne Parameter angepasst, um die Qualität dieses Systems zu verbessern, so werden dadurch auch immer die Modellierungsergebnisse der restlichen Systeme beeinflusst.

Ein Lösungsansatz könnte die Einführung eines oder mehrerer neuer Assoziat für dieses System sein. Hier ist darauf zu achten, dass diese mit den bereits gut funktionierenden thermochemischen Berechnungen konsistent sind und diese nicht negativ beeinflussen. Ziel ist ein Gesamtmodell, mit dem sich thermochemische und thermophysikalische Eigenschaften von Schlacken berechnen lassen.

Beim Vergleich mit bereits in der Literatur vorhandenen Modellen liefert das neue Modell stets überzeugende Ergebnisse. Es bietet den großen Vorteil, dass sich für jede beliebige Zusammensetzung die Viskositäten bei unterschiedlichen Temperaturen berechnen lassen. Die anderen Modelle bieten an der einen Stelle die etwas besseren Ergebnisse, jedoch weichen sie an anderer Stelle deutlich stärker ab oder es lassen sich überhaupt keine Berechnungen durchführen. Bei SiO_2 und Al_2O_3 , den Binärsystemen $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ und $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$, sowie den Ternärsystemen $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ und $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ liefert das neue Modell die besten Ergebnisse. Über alle Systeme gesamt betrachtet ist das neue Modell bei zukünftigen Berech-

nungen vorzuziehen, da die Modellierung im Durchschnitt am besten mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmt.

Durch den Aufbau des neuen Modells auf tatsächlichen strukturellen Eigenschaften, die sich aus thermochemischen Berechnungen ergeben, lässt es sich sehr einfach um weitere Komponenten erweitern. Im nächsten Schritt geht es zunächst darum, die Erdalkalioxide MgO und CaO zu integrieren. Danach folgen FeO bzw. Fe_2O_3 . Mit diesem 7-Komponentensystem ließen sich dann auch Viskositäten von realen, aus der Vergasung stammenden Kohleschlacken beschreiben.

Eine weitere sinnvolle Ergänzung wäre die Möglichkeit, auch Viskositäten von Teilschmelzen berechnen zu können. Von der mathematischen Seite her ist dieser Schritt sehr einfach. Es wird die Formel von Roscoe-Einstein verwendet (siehe Kapitel 2.3.1 auf Seite 29). Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass die bereits bestimmten Faktoren für die Assoziat gleich bleiben. Die Schwierigkeiten liegen in der Bestimmung der benötigten Parameter in Form des bereits erstarrten Volumens und der Zusammensetzung der Restschmelze. Eine Verifizierung durch entsprechende Literaturstellen könnte ein weiteres Problem darstellen. Neben der Viskosität werden genaue Angaben über den Feststoffanteil und die Restschmelzezusammensetzung benötigt.

Literaturverzeichnis

- [1] RÖSLER, H.J.: Die anorganischen Komponenten der Kohlen / Sitzungsberichte der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig - Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Band 122, Heft 6. 1991. – Forschungsbericht
- [2] ENERGIEWIRTSCHAFTLICHES INSTITUT AN DER UNIVERSITÄT ZU KÖLN: Energiereport IV: Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030 - Energiewirtschaftliche Referenzprognose / Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit. 2005. – Forschungsbericht
- [3] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: World Energy Outlook 2010 / International Energy Agency. 2010. – Forschungsbericht
- [4] MILLES, U.: BINE basisEnergie 17: Effiziente Kraftwerke / FIZ Karlsruhe GmbH. 2004. – Forschungsbericht
- [5] HEA - FACHGEMEINSCHAFT FÜR EFFIZIENTE ENERGIEANWENDUNG E.V.: *Lexikon Energiewelten*. <http://www.energiwelten.de/>
- [6] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE: Forschungsbericht Nr. 566 - Leuchtturm COORETEC Der Weg zum zukunftsfähigen Kraftwerk mit fossilen Brennstoffen / Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. 2007. – Forschungsbericht
- [7] OGRISECK, K. ; MILLES, U.: BINE projektinfo 09/06 - Kraftwerke mit Kohlenvergasung / FIZ Karlsruhe GmbH. 2006. – Forschungsbericht
- [8] HIGMAN, C. ; BURGT, M. van d.: *Gasification*. Elsevier Science, 2003
- [9] CERBE, G.: *Grundlagen der Gastchnik*. Carl Hanser Verlag, 2008
- [10] HARRIS, D.: *Coal Gasification in Low Emissions Power Technologies*. Australia-China Energy Symposium. <http://www.science.org.au/events/conferences-and-workshops/australiachina/harris.pdf>. Version: 2006

- [11] RADIG, W.: *Vergasung als Option der thermochemischen Nutzung von Biomasse*. 2007
- [12] OGRISECK, S.: *IGCC - Vergasungsbasierte Erzeugung von Strom*. 2010
- [13] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ARBEIT: Dokumentation Nr. 527 - Forschung- und Entwicklungskonzept für emissionsarme fossil befeuerte Kraftwerke / Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit. 2003. – Forschungsbericht
- [14] WEINDLICH, A.: *Doktorandenseminar*. 2009
- [15] SCHLÜTER, A.: *Untersuchungen zum Verschmutzungsverhalten rheinischer Braunkohlen in Kohledampferzeugern*, RWTH Aachen, Diss., 2008
- [16] CARPENTER, A. M. ; NIKSA, S. ; SCOTT, D. H. ; WU, Z.: Effects of coal ash on combustion systems / IEA Clean Coal Centre. Version: 2005. <http://www.coalonline.info/site/coalonline/content/browser/81353/Effects-of-coal-ash-on-combustion-systems>. 2005. – Forschungsbericht
- [17] ROSIN, P. ; FEHLING, R.: *Die Flugschlacke: 1. Verschlackung von Heizflächen, 2. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Asche und ihr Einfluss auf die Verschlackung, 3. Verfahren zur Prüfung des Verhaltens der Flugschlacke*. VDI-Verlag Berlin
- [18] BOTTINGA, Y. ; RICHET, P.: Silicate melt structural relaxation: rheology, kinetics, and Adam-Gibbs theory. In: *Chemical Geology* 128 (1996), S. 129–141
- [19] FOLKEDAHL, B. C. ; SCHOBERT, H. H.: Effects of Atmosphere on Viscosity of Selected Bituminous and Low-Rank Coal Ash Slags. In: *Energy & Fuels* 19 (2005), S. 208–215
- [20] HIMES, R.: Slag Viscosity Measurements / Energy & Environmental Research Center. 2001. – Forschungsbericht
- [21] SOMMER, K. ; WÜNSCH, K.-H. ; ZETTLER, M.: *Wissensspeicher Chemie*. Volk und Wissen Verlag, 1998
- [22] SEOK, J.-W.: *Thermodynamische Modellrechnungen zur Entwicklung korrosionsbeständiger keramischer Werkstoffe für den Flüssigascheabscheider in kohlenstaubbefeuerten Energieanlagen*, RWTH Aachen, Diss., 2002
- [23] IVANOV, O.: *Metallurgische Grundlagen zur Optimierung von Hochofenschlacken mit Bezug auf die Alkalikapazität*, TU Bergakademie Freiberg, Diss., 2002

-
- [24] ALLIBERT, M. ; GAYE, H. ; GEISELER, J. ; JANKE, D. ; KEENE, B. J. ; KIRNER, D. ; KOWALSKI, M. ; LEHMANN, J. ; MILLS, K. C. ; NEUSCHÜTZ, D. ; PARRA, R. ; SAINT-JOURS, C. ; SPENCER, P. J. ; SUSA, M. ; TMAR, M. ; WOERMANN, E.: *Slag Atlas 2nd Edition*. Verlag Stahleisen GmbH, 1995
- [25] FROHBERG, M. G. ; KAPOOR, M. L.: Die Anwendung eines neuen Basizitätsmaßes auf metallurgische Reaktionen. In: *Stahl und Eisen* 91 (1971), S. 182–188
- [26] *3D-Darstellungen von Molekülen*. <http://www.3dchem.com/>
- [27] HINZ, W.: *Silikate - Grundlagen der Silikaturwissenschaft und Silikattechnik, Band 1*. VEB Verlag für Baumwesen, 1970
- [28] HELLBRÜGGE, H. ; ENDELL, K.: Zusammenhänge zwischen chemischer Zusammensetzung und Flüssigkeitsgrad von Hüttenschlacken sowie ihre technische Bedeutung. In: *Archiv Eisenhüttenwesen* 14 (1941), S. 307–315
- [29] DIETZEL, A.: Strukturchemie des Glases. In: *Die Naturwissenschaften* 29 (1941), S. 537–547
- [30] SCHENK, H.: *Einführung in die physikalische Chemie der Eisenhüttenprozesse - Band 2: Die Stahlerzeugung*. Julius Springer Verlag, 1934
- [31] HASSE, S.: *Giesserei Lexikon*. Fachverlag Schiele & Schön, 2008
- [32] NOWOK, J. W. ; HURLEY, J.P. ; STEADMAN, E. N.: The impact of ash deposition on coal fired plants. In: *Proceedings of the Engineering Foundation Conference* Bd. 6, 1994, S. 21–25
- [33] MUDERSBACH, D. ; GEISELER, J. ; KÜHN, M.: Optimierung mathematischer Modelle zur Viskositätsberechnung von Schlacken. In: *Report des Forschungsinstituts Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken e.V.* 2 (1999), S. 9–12
- [34] NÖLLE, G.: *Technik der Glasherstellung*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1997
- [35] WITTHOHN, A.: *Freisetzung von Alkalien aus Kohlen und Kohlenaschen*, RWTH Aachen, Diss., 1999
- [36] MEZGER, T.G.: *Das Rheologie Handbuch*. Hannover : Vincentz Network, 2006
- [37] SCHRAMM, G.: *Einführung in Rheologie und Rheometrie*. Thermo Electron GmbH, 2004

- [38] VARGAS, S. ; FRANDSEN, F.J. ; DAM-JOHANSEN, K.: Rheological properties of high-temperature melts of coal ashes and other silicates. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 27 (2001), S. 237–429
- [39] GIESEKUS, H.: *Phänomenologische Rheologie - Eine Einführung*. Springer Verlag, 1994
- [40] EINSTEIN, A.: Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen. In: *Annalen der Physik* 324 (1906), S. 289–306
- [41] YAO, T. P.: Über die Viskosität im binären System. In: *Gießereitechnisch Wissenschaftliches Beiheft* 17 (1957), S. 897–907
- [42] ROSCOE, R.: The viscosity of suspensions of rigid spheres. In: *British Journal of Applied Physics* 3 (1952), S. 267–269
- [43] BRINKMAN, H. C.: The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. In: *The Journal of Chemical Physics* 20 (1952), Nr. 4, S. 571
- [44] HAPPEL, J.: Viscosity of Suspensions of Uniform Spheres. In: *Journal of Applied Physics* 28 (1957), Nr. 11, S. 1288–1292
- [45] REID, W. T. ; COHEN, P.: Factors affecting the thickness of coal-ash slag on furnace wall tubes. In: *Transactions of the ASME* 66 (1944), S. 685–690
- [46] MA, M.: *Hochtemperaturviskositätsuntersuchungen an Kohlenaschen und Schlacken aus der SFGT Flugstromvergasung unter reduzierenden Bedingungen*, Universität Paderborn, Diplomarbeit, 2009
- [47] KONDRATIEV, A. ; JAK, E.: A Quasi-Chemical Viscosity Model for Fully Liquid Slags in the $Al_2O_3-CaO-FeO-SiO_2$ System. In: *Metallurgical and Materials Transactions B* 36B (2005), S. 623–638
- [48] BESMANN, T. M. ; SPEAR, K. E.: Thermochemical modeling of oxide glasses. In: *Thermochemical Modeling of Oxide Glasses* 85 (2002), Nr. 12, S. 2887–2894
- [49] AVRAMOV, I. ; MILCHEV, A.: Effect of disorder on diffusion and viscosity in condensed systems. In: *Journal of Non-Crystalline Solids* 104 (1988), S. 253–260
- [50] AVRAMOV, I.: Influence of disorder on viscosity of undercooled melts. In: *Journal of Chemical Physics* 95 (1991), S. 4439–4443

-
- [51] AVRAMOV, I. ; RÜSSEL, C. ; KEDING, R.: Effect of chemical composition on viscosity of oxide glasses. In: *Journal of Non-Crystalline Solids* 324 (2003), S. 29–35
- [52] QUON, David H. H. ; WANG, Schubert S. B. ; CHEN, Tzong T.: Viscosity measurements of slags from pulverized western Canadian coals in a pilotscale research boiler. In: *Fuel* 63 (1984), S. 939–942
- [53] STREETER, Robert C. ; DIEHL, Erle K. ; SCHOBERT, Harold H.: Measurement and Prediction of Low-Rank Coal Slag Viscosity. In: *Preprints of papers - American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry* 28 (1984), S. 174–184
- [54] QUON, D. H. H. ; WANG, S. S. B. ; CHEN, T. T.: Viscosity Measurements of Slags from Western Canadian Coals. In: *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 107 (1985), S. 803–806
- [55] SCHOBERT, Harold H. ; STREETER, Robert C. ; DIEHL, Erle K.: Flow properties of low-rank coal ash slags. In: *Fuel* 64 (1985), S. 1611–1617
- [56] NOWOK, Jan W. ; BIEBER, Jay A. ; BENSON, Steven A. ; JONES, Michael L.: Physicochemical effects influencing the measurements of interfacial surface tension of coal ashes. In: *Fuel* 70 (1991), S. 951–956
- [57] NOWOK, Jan W.: Viscosity and Structural State of Iron in Coal Ash Slags under Gasification Conditions. In: *Energy & Fuels* 9 (1995), S. 534–539
- [58] OH, M.S. ; BROOKER, D.D. ; PAZ, E.F. de ; BRADY, J.J. ; DECKER, T.R.: Effect of crystalline phase formation on coal slag viscosity. In: *Fuel Processing Technology* 44 (1995), S. 191–199
- [59] BROOKER, D. D. ; OH, M. S. ; GROEN, J. C.: Gasification slag rheology in titanium-rich, iron and calcium-aluminosilicate glasses. In: *Preprints of papers - American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry* 41 (1996), S. 681–685
- [60] HURLEY, John P. ; WAME, Tina M. ; NOWOK, Jan W.: The effects of atmosphere and additives on coal slag viscosity. In: *Preprint of Paper - American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry* 41 (1996), S. 691–694
- [61] HURST, H. J. ; NOVAK, F. ; PATTERSON, J. H.: Phase Diagram Approach to the Fluxing Effect of Additions of CaCO₃ on Australian Coal Ashes. In: *Energy & Fuels* 10 (1996), S. 1215–1219

- [62] KIM, H. T. ; BAE, H. J. ; LEE, S. H. ; PARK, J. S. ; YUN, Y. S. ; CHUNG, S. W.: Slagging and fluidity behavior of coal ash under gasifier environment. In: *International Pittsburgh Coal Conference* Bd. 14, 1997
- [63] GROEN, J.C. ; BROOKER, D.D. ; WELCH, P.J. ; OH, M.S.: Gasification slag rheology and crystallization in titanium-rich, iron-calcium-aluminosilicate glasses. In: *Fuel Processing Technology* 56 (1998), S. 103–127
- [64] HURST, H. J. ; NOVAK, F. ; PATTERSON, J. H.: Viscosity measurements and empirical predictions for fluxed Australian bituminous coal ashes. In: *Fuel* 78 (1999), S. 1831–1840
- [65] CHO, Donghyun ; MOON, Insik ; WHANG, Suyeon ; OH, Myongsook: High Temperature Slag Viscometry. In: *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 7 (2001), S. 30–37
- [66] FOLKEDAHL, Bruce C. ; SCHOBERT, Harold H.: Effects of Atmosphere on Viscosity of Selected Bituminous and Low-Rank Coal Ash Slags. In: *Energy & Fuels* 19 (2005), S. 208–215
- [67] YUN, Yongseung ; YOO, Young D. ; CHUNG, Seok W.: Selection of IGCC candidate coals by pilot-scale gasifier operation. In: *Fuel Processing Technology* 88 (2007), S. 107–116
- [68] MATYAS, J. ; SUNDARAM, S. K. ; RODRIGUEZ, C. P. ; EDMONDSON, A. B. ; ARRIGONI, B. M.: Slag Penetration into Refractory Lining of Slagging Coal Gasifier. In: *International Pittsburgh Coal Conference* Bd. 4, 2008, S. 2209–2218
- [69] MATYAS, J. ; SUNDARAM, S. K. ; HICKS, B. J. ; EDMONDSON, A. B. ; ARRIGONI, B. M.: Slag-refractory interaction in slagging coal gasifiers. In: *Materials science forum*, 2008, S. 397–405
- [70] LI, Xiaoyu ; LI, Guangyu ; CAO, Zidong ; XU, Shisen: Research on Flow Characteristics of Slag Film in a Slag Tapping Gasifier. In: *Energy & Fuels* 24 (2010), S. 5109–5115
- [71] MORI, S. ; OHTANI, E. ; SUZUKI, A.: Viskosity of the albite melt to 7GPa at 2000K. In: *Earth and Planetary Science Letters* 175 (2000), S. 87–92
- [72] KUSHIRO, I.: Changes in viscosity and structure of melt $NaAlSi_2O_6$ composition at high pressures. In: *Journal of Geophysical Research* 81 (1976), S. 6347–6350

-
- [73] KUSHIRO, I.: Viscosity and structural changes of albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) melt at high pressures. In: *Earth and Planetary Science Letters* 41 (1978), S. 87–90
- [74] SUZUKI, A. ; OHTANI, E. ; FUNAKOSHI, K. ; TERASAKI, H. ; KUBO, T.: Viscosity of albite melt at high pressure and high temperature. In: *Physics and Chemistry of Minerals* 29 (2002), S. 159–165
- [75] TINKER, D. ; LESHER, C. E. ; BAXTER, G. M. ; UCHIDA, T. ; WANG, Y.: High-pressure viscosimetry of polymerizedsilicate melts and limitations of the Eyring equation. In: *American Mineralogist* 89 (2004), S. 1701–1708
- [76] *Kapitel* Viscosity of iron-silicate slags at copper smelting conditions. In: VARTIAINEN, A.: *Sulfide Smelting '98 - Current and Future Practices*. The Minerals, Metals & Materials Society, 1998, S. 363–371
- [77] ZENTRALABTEILUNG FÜR CHEMISCHE ANALYSEN (ZCH), FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH: *Atomemissionsspektalanalyse mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)*. <http://www.fz-juelich.de/zch/DE/Leistungen/AnalytischeVerfahren/Identifizierung/ICP-OES.html>
- [78] UNIVERSITÄT TRIER: *Röntgendiffraktometrie*. <http://www.uni-trier.de/index.php?id=6751>
- [79] UNIVERSITÄT KIEL: *Polarisationsmikroskopie*. http://www.geophysik.uni-kiel.de/~sabine/DieErde/Mineralogie/Werkzeug_PolMik.htm
- [80] YAZHENSKIKH, E. ; HACK, K. ; MÜLLER, M.: Critical thermodynamic evaluation of oxide systems relevant to fuel ashes and slags, Part 1: Alkali oxide - silica systems. In: *Calphad* 30 (2006), S. 270–276
- [81] YAZHENSKIKH, E. ; HACK, K. ; MÜLLER, M.: Critical thermodynamic evaluation of oxide systems relevant to fuel ashes and slags, Part 2: Alkali oxide - alumina systems. In: *Calphad* 30 (2006), S. 397–404
- [82] YAZHENSKIKH, E. ; HACK, K. ; MÜLLER, M.: Critical thermodynamic evaluation of oxide systems relevant to fuel ashes and slags, Part 3: silica-alumina systems. In: *Calphad* 32 (2008), S. 195–205
- [83] YAZHENSKIKH, E. ; HACK, K. ; MÜLLER, M.: Critical thermodynamic evaluation of oxide systems relevant to fuel ashes and slags, Part 4: Sodium oxide-potassium oxide-silica. In: *Calphad* 32 (2008), S. 506–513

- [84] YAZHENSKIKH, E. ; HACK, K. ; MÜLLER, M.: Critical thermodynamic evaluation of oxide systems relevant to fuel ashes and slags, Part 5: Potassium oxide-alumina-silica. In: *Calphad* 35 (2011), S. 6–19
- [85] LEKO, V. K. ; GUSAKOVA, N. K. ; MESHCHERYAKOVA, E. V. ; PROKHOROVA, T. I.: The effect of additions of alkali oxides, hydroxylgroups, Al₂O₃ and Ga₂O₃ on viscosity of vitreous silica (in Russian). In: *Fizika i Khimiya Stekla* 3 (1977), Nr. 3, S. 219–225. – SciGlass-ID: 2967
- [86] URBAIN, G. ; BOTTINGA, Y. ; RICHET, P.: Viscosity of liquid silica, silicates and alumino-silicates. In: *Geochim.Cosmochim.Acta* 46 (1982), Nr. 6, S. 1061–1072. – SciGlass-ID: 1967
- [87] BRUISTEN, P. M. ; DAM, H. B. B.: Viscosity measurement of quartz glass. In: *Proc.1st Intern.Conf.Fundamentals of Glass Manufacturing Process, Sheffield*, 1991, S. 18–21. – SciGlass-ID: 13525
- [88] DUNN, S. A.: Viscous behavior of silica with tungsten inclusions. In: *Am.Ceram.Soc.Bull.* 47 (1968), Nr. 6, S. 554–559. – SciGlass-ID: 2975
- [89] ELYUTIN, V. P. ; KOSTIKOV, V. I. ; MITIN, B. S. ; NAGIBIN, Y. A.: Measurements of viscosity of aluminium oxide (in Russisch). In: *Zh.Fiz.Khim.* 43 (1969), Nr. 3, S. 579–583. – SciGlass-ID: 12406
- [90] KOZAKEVITCH, P.: Viscosite et elements structuraux des alumino-silicates fondus: leitiers CaO-Al₂O₃-SiO₂ entre 1600 et 2000 °C. In: *Rev.Metall.* 57 (1960), Nr. 2, S. 149–160. – SciGlass-ID: 5886
- [91] PRESTON, E.: The Viscosity of the Soda-Silica Glasses at High Temperatures and its Bearing on their Constitution. In: *J.Soc.Glass Technol.* 22 (1938), Nr. 90, S. 45–81. – SciGlass-ID: 2713
- [92] KAWAHARA, M. ; MORINAGA, K. ; T. YANAGASE, 1977 vol. 41 No. 10 p. 1047-1052: Measurement of the viscosity and the infrared spectrum of the Na₂O-SiO₂-MgO ternary system. In: *J.Jpn Inst.Metals* 41 (1977), Nr. 10, S. 1047–1052. – SciGlass-ID: 4207
- [93] ASAYAMA, O. ; TAKEBE, H. ; MORINAGA, K.: Critical cooling rates for the formation of glass for silicate melts. In: *Iron Steel Inst.Journ.Intern.* 33 (1993), Nr. 1, S. 233–238. – SciGlass-ID: 4207

-
- [94] MAZURIN, O. V. ; TRETJAKOVA, N. I.: On correlation of viscosity of glasses in the system Na₂O-BaO-SiO₂ with a phase diagram (in Russisch). In: *Neorg.Mater.* 6 (1970), Nr. 11, S. 2022–2026. – SciGlass-ID: 410
- [95] OTA, R. ; WAKASUGI, T. ; KAWAMURA, W. ; TUCHIYA, B. ; FUKUNAGA, J.: Glass formation and crystallization in Li₂O-Na₂O-K₂O-SiO₂. In: *J.Non-Cryst.Solids* 188 (1995), Nr. 1-2, S. 136–146. – SciGlass-ID: 7208
- [96] SHVAIKO-SHVAIKOVSKAYA, T. P.: Viscosity of glasses of sodium calcium-silicate system within a broad temperature range (in Russisch). In: *Steklo* 3 (1968), Nr. 3, S. 93–95. – SciGlass-ID: 3328
- [97] SHVAIKO-SHVAIKOVSKAYA, T. P. ; GUSAKOVA, N. K. ; MAZURIN, O. V.: The viscosity of glasses in the Na₂O-CaO-SiO₂ system within a wide temperature range (in Russisch). In: *Neorg.Mater.* 7 (1971), Nr. 4, S. 713–713. – SciGlass-ID: 3328
- [98] SHVAIKO, T. P. ; GUSAKOVA, N. K. ; MAZURIN, O. V.: *Vyazkost Stekol Sistemy Na₂O-CaO-SiO₂ v Shirokom Intervale Temperatur (in Russisch)*. Deposited in VINITI, 1971. – No.483-71, SciGlass-ID: 3328
- [99] LILLIE, H. R.: High-temperature viscosities of soda-silica glasses. In: *J.Am.Ceram.Soc.* 22 (1939), Nr. 11, S. 367–374. – SciGlass-ID: 2714
- [100] PRESTON, E.: The Viscosity of the Soda-Silica Glasses at High Temperatures and its Bearing on their Constitution. In: *J.Soc.Glass Technol.* 22 (1938), Nr. 90, S. 45–81. – SciGlass-ID: 2712
- [101] SHVAIKO-SHVAIKOVSKAYA, T. P. ; MAZURIN, O. V. ; BASHUN, Z. S.: The viscosity of glasses in the Na₂O-SiO₂ system in a molten state (in Russisch). In: *Neorg.Mater.* 7 (1971), Nr. 1, S. 143–147. – SciGlass-ID: 2725
- [102] SKORNYAKOV, M. M. ; KUZNETSOV, A. Y. ; EVSTROPIEV, K. S.: Viscosity of the system Na₂SiO₃-SiO₂ in molten state (in Russian). In: *Zh.Fiz.Khim.* 15 (1941), Nr. 1, S. 116–124. – SciGlass-ID: 2717
- [103] *Kapitel* Viscosity of glasses in the Na₂O-PbO-SiO₂ system at high temperatures (in Russisch). In: SKORNYAKOV., M. M.: *Fiziko-Khimicheskie Svoistva Troinnoi Sistem Na₂O-PbO-SiO₂*. Moskau, 1949, S. 39–69. – SciGlass-ID: 2717
- [104] KIM, K. D.: Viscosity in mixed-alkali alumino-silicate glass melts. In: *Proc.XVIIth Intern.Congr.on Glass, Beijing* Bd. 3, 1995, S. 747–752. – SciGlass-ID: 8101

- [105] MIZOGUCHI, K. ; OKAMOTO, K. ; SUGINOHARA, Y.: Oxygen coordination of Al^{3+} ion in several silicate melts studied by viscosity measurements. In: *J.Jpn Inst.Metals* 46 (1982), Nr. 11, S. 1055–1060. – SciGlass-ID: 1955
- [106] POHLMANN, H.-J.: Viskositätsuntersuchungen an Gläsern im kieselssäurereichen Teil des Systems $K_2O-PbO-SiO_2$. In: *Glastech.Ber.* 49 (1976), Nr. 8, S. 177–182. – SciGlass-ID: 9508
- [107] SARINGYULYAN, R. S. ; KOSTANYAN, K. A.: On temperature dependence of electrical conductivity of glasses in a broad temperature range (in Russisch). In: *Arm.Khim.Zh.* 23 (1970), Nr. 10, S. 928–936. – SciGlass-ID: 3561
- [108] *Kapitel* Role of viscosity in a study of electrical conductivity of glasses of system $K_2O-PbO-SiO_2$ (in Russisch). In: SARINGYULYAN, R. S. ; KOSTANYAN, K. A.: *Stekloobraznoe Sostoyanie, Leningrad.* 1971, S. 289–291. – SciGlass-ID: 3561
- [109] SARINGYULYAN, R. S.: *Vyazkost i Elektroprovodnost Stekol Sistemy $K_2O-PbO-SiO_2$ v Shirokom Intervale Temperatur.* 1972. – SciGlass-ID: 3561
- [110] *Kapitel* Electrical conductivity of molten lead containing glasses (in Russisch). In: KOSTANYAN, K. A. ; SARINGYULYAN, R. S.: *Elektrokhimiya i Rasplavy, Moskva.* 1974, S. 193–201. – SciGlass-ID: 3561
- [111] *Kapitel* Some problems of the theory of electrical conductivity of molten glasses (in Russian). In: SARINGYULYAN, R. S. ; KOSTANYAN, K. A.: *Stekloobraznoe Sostoyanie, Erevan.* 1974, S. 31–36. – SciGlass-ID: 3561
- [112] SHARTSIS, L. ; SPINNER, S. ; CAPPS, W.: Density, expansivity, and viscosity of molten alkali silicates. In: *J.Am.Ceram.Soc.* 35 (1952), Nr. 6, S. 155–160. – SciGlass-ID: 3144
- [113] *Kapitel* Investigation of the manifestation of mixed-alkali effect on electro-migrational and viscous properties of melts (in Russisch). In: VASILJEV, A. I. ; LISENENKOV, A. A. ; RASHIN, G. A.: *Tezisy IV Simp.po Elektricheskim Svoistvam i Stroeniyu Stekla,Erevan.* 1977, S. 32–34. – SciGlass-ID: 7240
- [114] *Kapitel* Study of viscosity of the melts of mixed-alkali glasses (in Russisch). In: VASILJEV, A. I. ; LISENENKOV, A. A.: *Proizvodstvo i Issledovanie Stekla i Silikatnykh Materialov, Yaroslavl.* 1978 (6), S. 144–148. – SciGlass-ID: 7240
- [115] KANI, K.: Viscosity phenomena of the system $KAlSi_3O_8-NaAlSi_3O_8$ and of perthite at high temperatures. In: *Proc.Imper.Acad.Tokyo* 11 (1935), Nr. 8, S. 334–336. – SciGlass-ID: 2563

-
- [116] KANI, K.: Viscosity phenomena of the system $\text{KAlSi}_3\text{O}_8\text{-NaAlSi}_3\text{O}_8$ and of perthite at high temperatures. In: *Am.Ceram.Soc.Bull.* 23 (1944), Nr. 10, S. 375–377. – SciGlass-ID: 2563
- [117] KOZU, S. ; KANI, K.: Viscosity measurements of the ternary system diopside-albite-anorthite at high temperatures. In: *Am.Ceram.Soc.Bull.* 23 (1944), Nr. 10, S. 377–378. – SciGlass-ID: 2561
- [118] NEUVILLE, D. R. ; RICHEL, P.: Viscosity and entropy of liquid mixtures in the $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$ system. In: *Riv.Staz.Sper.Vetro* 20 (1990), Nr. 6, S. 213–220. – SciGlass-ID: 14792
- [119] SCARFE, C. M. ; CRONIN, D. J.: Viscosity-temperature relationships of melts at 1 atm in the system diopside-albite. In: *Am.Mineral.* 71 (1986), S. 767–771. – SciGlass-ID: 29425
- [120] URBAIN, G. ; BOTTINGA, Y. ; RICHEL, P.: Viscosity of liquid silica, silicates and alumino-silicates. In: *Geochim.Cosmochim.Acta* 46 (1982), Nr. 6, S. 1061–1072. – SciGlass-ID: 3483
- [121] CRANMER, D. ; UHLMANN, D. R.: Viscosities in the system albite-anorthite. In: *J.Geophys.Res.* 86 (1981), Nr. B9, S. 7951–7956. – SciGlass-ID: 15479
- [122] DINGWELL, D. B.: Viscosity-temperature relationships in the system $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5\text{-Na}_4\text{Al}_2\text{O}_5$. In: *Geochim.Cosmochim.Acta* 50 (1986), S. 1261–1265. – SciGlass-ID: 2012
- [123] MIZOGUCHI, K. ; OKAMOTO, K. ; SUGINOHARA, Y.: Oxygen coordination of Al^{3+} ion in several silicate melts studied by viscosity measurements. In: *J.Jpn Inst.Metals* 46 (1982), Nr. 11, S. 1055–1060. – SciGlass-ID: 3353
- [124] SASEK, L.: The structure and properties of silicate melts. 6. The Viscosity of simple alkali-silicate melts. In: *Sb.Vys.Sk.Chem.Technol.Praze,Chem.Technol.Silik.* L6 (1975), S. 61–93. – SciGlass-ID: 3317
- [125] SASEK, L. ; MEISSNEROVA, H. ; PROCHAZKA, J.: The structure and properties of silicate melts. 7. The effects of the size of Me^+ and Me^{++} ions on the viscosity of silicate melts. In: *Sb.Vys.Sk.Chem.Technol.Praze,Chem.Technol.Silik.* L6 (1975), S. 95–129. – SciGlass-ID: 3317

- [126] SASEK, L. ; LISY, A.: The structure and properties of silicic melts. I. The effect of the size of ions on melt density at high temperatures. In: *Sb. Vys.Sk. Chem. Technol. Praze, Chem. Technol. Silik.* L2 (1972), S. 165–215. – SciGlass-ID: 3317
- [127] MACKENZIE, J. D.: The discrete ion theory and viscous flow in liquid silicates. In: *Trans. Faraday Soc.* 53 (1957), Nr. 11, S. 1488–1493. – SciGlass-ID: 16338
- [128] WEISS, W.: A rapid torsion method for measuring the viscosity of silica glasses up to 2200°C. In: *J. Am. Ceram. Soc.* 67 (1984), Nr. 3, S. 213–222. – SciGlass-ID: 2966
- [129] CLASEN, R. ; HERMANN, W.: Differences in properties of natural and synthetic silica glass on the basis of impurity levels. In: *Boll. Soc. Espan. Ceram. Vidrio (Proc. XVI Intern. Congr. on Glass, Madrid)* Bd. 31-C, 1992, S. 233–238. – SciGlass-ID: 5648
- [130] GUSAKOVA, N. K. ; LEKO, V. K. ; MESHCHERYAKOVA, E. V. ; LEBEDEVA, R. B.: Investigation of viscosity of different silica glasses in the broad temperature range (in Russisch). In: *Neorg. Mater.* 10 (1974), Nr. 2, S. 338–340. – SciGlass-ID: 2957
- [131] BRUCKNER, R.: Charakteristische physikalische Eigenschaften der oxydischen Hauptglasbildner und ihre Beziehung zur Struktur der Glaser Teil I: Schmelz- und Viskositätsverhalten der Hauptglasbildner. In: *Glastech. Ber.* 37 (1964), Nr. 9, S. 413–425. – SciGlass-ID: 2974
- [132] PAVLOVA, G. A. ; AMATUNI, A. N.: Physico-chemical properties of glasses with low thermal expansion coefficient in the system SiO₂-TiO₂. (in Russisch). In: *Neorg. Mater.* 11 (1975), Nr. 9, S. 1686–1689. – SciGlass-ID: 1440
- [133] SHIRAKI, K. ; OHASHI, M. ; TAJIMA, K. ; TATEDA, M. ; TSUJIKAWA, K.: Viscosity of F and GeO₂ codoped silica glass. In: *Electronics Letters* 29 (1993), Nr. 14, S. 1263–1265. – SciGlass-ID: 5651
- [134] PAEK, U. C. ; SCHROEDER, C. M. ; KURKJIAN, C. R.: Determination of the viscosity of high silica glasses during fibre drawing. In: *Glass Technology* 29 (1988), Nr. 6, S. 263–266. – SciGlass-ID: 12682
- [135] BOWEN, D. W. ; TAYLOR, R. W.: Silica viscosity from 2300° to 2600° K. In: *Am. Ceram. Soc. Bull.* 57 (1978), Nr. 9, S. 818–819. – SciGlass-ID: 2978
- [136] KOZAKEVITCH, P.: Viscosité et éléments structuraux des alumino-silicates fondus: leitiers CaO-Al₂O₃-SiO₂ entre 1600 et 2000 °C (in Französisch). In: *Rev. Metall.* 57 (1960), Nr. 2, S. 149–160. – SciGlass-ID: 3464

-
- [137] KAWAHARA, M. ; MORINAGA, K. ; YANAGASE, T.: Viscosity and electrical conductivity of Na₂O-SiO₂-NiO and CaO-SiO₂-NiO melts. In: *J.Jpn Inst.Metals* 43 (1979), Nr. 1, S. 55–60. – SciGlass-ID: 13784
- [138] *Kapitel Structure and physical properties of glass (in Russian).* In: WINTER-KLEIN, A.: *Stekloobraznoe Sostoyanie, Moskva-Leningrad.* 1965, S. 45–54. – SciGlass-ID: 16022
- [139] MIZOGUCHI, K. ; YAMANE, M. ; SUGINOHARA, Y.: Viscosity measurements of the molten MeO(Me=Ca, Mg, Na)-SiO₂-Ge₂O₃ silicate system. In: *J.Jpn Inst.Metals* 50 (1986), Nr. 1, S. 76–82. – SciGlass-ID: 4587
- [140] SCARFE, C. M. ; MYSEN, B. O. ; VIRGO, D.: Changes in viscosity and density of melts of sodium disilicate, sodium metasilicate, and diopside composition with pressure. In: *Carnegie Inst.Washington, Year Book* 78 (1979), S. 547–551. – SciGlass-ID: 11536
- [141] KURODA, K. ; KAWAHARA, M. ; MORINAGA, K. ; YANAGASE, T.: Viscosity and electrical conductivity of Na₂O-SiO₂-CoO and CaO-SiO₂-CoO melts. In: *J.Jpn Inst.Metals* 46 (1982), Nr. 3, S. 275. – SciGlass-ID: 6913
- [142] LOTTO, B. ; MACCA, C. ; BARBON, F.: Der Einfluss der Temperatur auf die Polarisationskurven von Glasschmelzen. In: *Silikattechnik* 20 (1969), Nr. 6, S. 193–196. – SciGlass-ID: 15032
- [143] ZAK, A. F. ; MANKO, Y. P.: Strength of fibers made from the simplest glass-forming compositions (in Russisch). In: *Nauchno-Issled.Tr.Inst.Steklyannogo Volokna* 3 (1952), Nr. 3, S. 3–12. – SciGlass-ID: 3037
- [144] APPEN, A. A. ; ARTEMJEV, V. I.: Interaction of iron with binary and ternary silicate melts (in Russisch). In: *Zh.Prinkl.Khim.* 37 (1964), Nr. 10, S. 2107–2112. – SciGlass-ID: 20572
- [145] URBAIN, G.: Liquids viscosity. Silice, alumina, Na and K oxides. Measurements and estimations. In: *Rev.Int.Hautes Temp.Refract.* 22 (1985), Nr. 1, S. 39–45. – SciGlass-ID: 12579
- [146] BOOW, J. ; TURNER, W. E. S.: The Viscosity and Working Characteristics of Glasses Part I: The Viscosity of Some Commercial Glasses at Temperatures Between Approximately 500° and 1400°. In: *J.Soc.Glass Technol.* 26 (1942), Nr. 117, S. 215–240. – SciGlass-ID: 3183

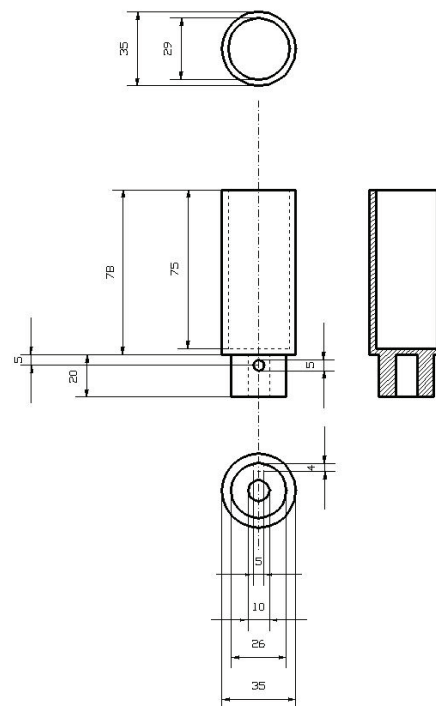
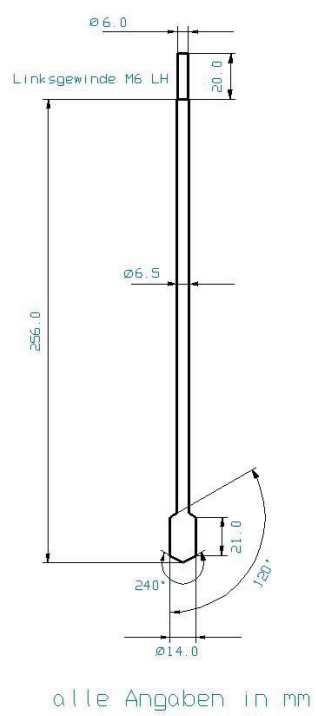
- [147] MEILING, G. S. ; UHLMANN, D. R.: Crystallisation and melting kinetics of sodium disilicate. In: *Phys.Chem.Glasses* 8 (1967), Nr. 2, S. 62–68. – SciGlass-ID: 3042
- [148] GRUSSAUTE, H. ; MONTAGNE, L. ; PALAVIT, G. ; BERNARD, J.-L.: Structural interpretation of the modification of soda-lime-silica glass properties by P_2O_5 . In: *Glastech.Ber., Glass Sci.Technol.* 73 (2000), Nr. 12, S. 380–384. – SciGlass-ID: 17369
- [149] OTA, R. ; FUKUNAGA, J.: Glass-forming tendency and crystallization behavior in the mixed alkali silicate system. In: *Advances in Fusion of Glass* Bd. 31. Am.Ceram.Soc., 1988. – SciGlass-ID: 10314
- [150] OTA, R. ; FUKUNAGA, J.: Vitrification kinetics in the mixed alkali silicate system. In: *Proc.XVth Intern.Congr.on Glass, Leningrad* Bd. 1a, 1989, S. 162–167. – SciGlass-ID: 10314
- [151] KOMLEVA, G. P.: A calculation of the viscosity of titanium-containing glasses and enamels (in Russisch). In: *Neorg.Mater.* 7 (1971), Nr. 7, S. 1285–1286. – SciGlass-ID: 7548
- [152] OTA, R. ; TSUCHIYA, F. ; KAWAMURA, K. ; NAKANISHI, S. ; FUKUNAGA, J.: High and medium range viscometers and their test with some alkali silicate glasses. In: *J.Ceram.Soc.Jpn* 99 (1991), Nr. 2, S. 168–172. – SciGlass-ID: 4109
- [153] HUNOLD, K. ; BRUCKNER, R.: Physikalische Eigenschaften und struktureller Feinbau von Natrium-Alumosilicatgläsern und -schmelzen. In: *Glastech.Ber.* 53 (1980), Nr. 6, S. 149–161. – SciGlass-ID: 9332
- [154] LOTTO, B.: Contribution to the study on the electrochemical behaviour of the sodium silicate at high temperature. In: *Vetro e Silicati* 10 (1966), Nr. 55, S. 5–10. – SciGlass-ID: 15031
- [155] DINGWELL, D. B. ; HESS, K.-U.: Melt viscosities in the system Na-Fe-Si-O-F-Cl: contrasting effects of F and Cl in alkaline melts. In: *Am.Mineral.* 83 (1998), S. 1016–1021. – SciGlass-ID: 20565
- [156] IVANOV, O. G. ; TRETJAKOVA, N. I. ; MAZURIN, O. V.: Modernized penetration viscometer by Klyuev and investigation of viscosities of glasses in the system K₂O-RO-SiO₃ (in Russisch). In: *Steklo Keram.* 7 (1969), Nr. 7, S. 42–45. – SciGlass-ID: 3329
- [157] TRETJAKOVA, N. I. ; MAZURIN, O. V.: *Vliyanie Okislov Dvukhvalentnykh Metallov na Vyazkost Prostyykh Silikatnykh Stekol (in Russisch)*. Deposited in VINITI, 1969. – No.995-69, SciGlass-ID: 3329

-
- [158] KIM, K. D.: Electrical conductivity in mixed-alkali aluminosilicate melts. In: *J.Am.Ceram.Soc.* 79 (1996), Nr. 9, S. 2422–2428. – SciGlass-ID: 8101
- [159] KIM, K.-D. ; LEE, S.-H.: Viscosity behavior and mixed alkali effect of alkali aluminosilicate glass melts. In: *J.Ceram.Soc.Jpn* 105 (1997), Nr. 10, S. 827–832. – SciGlass-ID: 8101
- [160] CHENG, J.-J. ; FAN, M.-X.: The effect of fluorine ions and hydroxyl groups on some properties of silicate glasses. In: *Collect.Pap. XIVth Intern.Congr. on Glass, New Delhi* Bd. 2, 1986, S. 225–232. – SciGlass-ID: 30132
- [161] DINGWELL, D. B.: Shear viscosities of galliosilicate liquids. In: *Am.Mineral.* 75 (1990), S. 1231–1237. – SciGlass-ID: 29210
- [162] ASAYAMA, O. ; TAKEBE, H. ; MORINAGA, K.: Critical cooling rates for the formation of glass for silicate melts. In: *Iron Steel Inst.Journ.Intern.* 33 (1993), Nr. 1, S. 233–238. – SciGlass-ID: 2129
- [163] TOPLIS, M. J. ; DINGWELL, D. B. ; HESS, K.-U. ; LENCI, T.: Viscosity, fragility, and configurational entropy of melts along the join $\text{SiO}_2\text{-NaAlSiO}_4$. In: *Am.Mineral.* 82 (1997), S. 979–990. – SciGlass-ID: 28793
- [164] TOPLIS, M. J. ; DINGWELL, D. B.: The structural role of aluminum in highly polymerized silicate melts: new insights from shear viscosity measurements. In: *Proc.XVIIIth Intern.Congr.on Glass CD-ROM, San Francisco*, 1998. – p. D5.86-6, SciGlass-ID: 24506
- [165] SAKKA, S. ; KAMIYA, K. ; KATO, N.: Viscosities of mixed alkali aluminosilicate glasses of the system $\text{Li}_2\text{O-Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. In: *Res.Rep.Fac.Eng.Mie Univ* 6 (1981), S. 81–92. – SciGlass-ID: 6868
- [166] STEIN, D. J. ; SPERA, F. J.: Experimental rheometry of melts and supercooled liquids in the system $\text{NaAlSiO}_4\text{-SiO}_2$: implications for structure and dynamics. In: *Am.Mineral.* 78 (1993), Nr. 7-8, S. 710–723. – SciGlass-ID: 15620
- [167] TOPLIS, M. J. ; DINGWELL, D. B.: The variable influence of P_2O_5 on the viscosity of melts of differing alkali/aluminium ratio: Implications for the structural role of phosphorus in silicate melts. In: *Geochim.Cosmochim.Acta* 60 (1996), Nr. 21, S. 4107–4121. – SciGlass-ID: 20564
- [168] SAKKA, S. ; KAMIYA, K. ; KATO, N.: Viscosities of mixed alkali aluminosilicate glasses of the system $\text{Li}_2\text{O-Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. In: *Res.Rep.Fac.Eng.Mie Univ* 6 (1981), S. 81–92. – SciGlass-ID: 6867

- [169] DINGWELL, D. B. ; KNOCHE, R. ; WEBB, S. L.: The effect of P₂O₅ on the viscosity of haplogranitic liquid. In: *Eur.J.Mineral.* 5 (1993), Nr. 1, S. 133–140. – SciGlass-ID: 17008
- [170] DINGWELL, D. B. ; KNOCHE, R. ; WEBB, S. L. ; PICHAVANT, M.: The effect of B₂O₃ on the viscosity of haplogranitic liquids. In: *Am.Mineral.* 77 (1992), Nr. 5-6, S. 457–461. – SciGlass-ID: 24529

A. Anhang

A.1. Technische Zeichnungen von Tiegel und Rührspindel



A. Anhang

A.2. Konstanten des Bottinga-Weill Schlacke-Modells

Table D1

D_i constants for $x_{\text{SiO}_2} \in [0.75; 0.81]$

T	1473	1523	1573	1623	1673	1723	1773	1823	1873	1923	1973	2023	2073
SiO ₂	5.92	5.56	5.19	4.87	4.56	4.26	4.00	3.72	3.49	3.26	3.03	2.83	2.62
TiO ₂	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
FeO	–	1.91	2.21	2.48	2.68	2.97	3.21	3.39	–	–	–	–	–
MnO	–	–	–1.99	–2.05	–2.78	–1.91	–	–	–	–	–	–	–
MgO	–0.26	1.66	–0.52	–0.59	–0.97	–0.89	–1.14	–1.17	–1.30	–1.39	–1.48	–1.56	–1.65
CaO	–1.09	–1.38	–1.47	–0.81	–1.57	–1.51	–2.25	–1.95	–	–	–	–	–
SrO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–2.69	–2.55	–2.48	–2.28
BaO	–	–	–	–	–	–2.43	–2.33	–2.25	–2.24	–2.19	–2.07	–2.06	–1.95
Li ₂ O	–	–7.17	–6.94	–6.46	–6.30	–6.02	–5.80	–5.42	–5.28	–5.25	–4.91	–4.65	–
Na ₂ O	–8.21	–8.10	–7.66	–7.07	–6.69	–5.98	–5.70	–5.34	–	–	–	–	–
K ₂ O	–6.60	–6.39	–6.08	–5.87	–5.63	–5.39	–	–	–	–	–	–	–
NaAlO ₂	8.47	7.99	7.51	6.99	6.56	6.18	5.75	5.42	5.02	4.66	4.38	4.03	3.78
BaAl ₂ O ₄	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CaAl ₂ O ₄	0.91	0.34	0.13	–0.54	–0.76	–1.23	–1.78	–2.10	–2.29	–2.45	–2.51	–2.69	–2.74
MgAl ₂ O ₄	0.65	–0.09	–0.69	–1.51	–2.09	–2.62	–2.88	–3.44	–3.52	–3.58	–3.59	–3.66	–3.67
MnAl ₂ O ₄	–	–	–5.02	–5.12	–4.99	–4.49	–	–	–	–	–	–	–

Table D2

D_i constants for $x_{\text{SiO}_2} \in [0.65; 0.75]$

T	1473	1523	1573	1623	1673	1723	1773	1823	1873	1923	1973	2023	2073
SiO ₂	5.74	5.39	5.02	4.69	4.36	4.08	3.81	3.53	3.30	3.06	2.82	2.62	2.41
TiO ₂	–2.82	–2.87	–2.21	–1.98	–1.91	–1.78	–1.52	–	–	–	–	–	–
FeO	–1.69	–1.85	–1.05	–0.81	–0.90	–0.95	–0.52	–	–	–	–	–	–
MnO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
MgO	–1.87	–1.71	–1.19	–1.49	–1.68	–1.55	–1.35	–1.18	–1.17	–1.39	–1.21	–0.96	–0.55
CaO	–1.24	–3.01	–2.84	–2.74	–2.71	–2.63	–2.78	–2.61	–1.87	–2.57	–2.59	–2.53	–2.44
SrO	–	–	–	–	–	–	–2.04	–3.54	–1.99	–2.01	–2.04	–2.01	–2.00
BaO	–	–	–	–	–	–3.65	–3.43	–3.37	–3.36	–3.17	–3.07	–2.95	–2.83
Li ₂ O	–6.05	–5.83	–5.61	–5.35	–5.09	–4.89	–4.75	–4.76	–4.58	–4.39	–	–	–
Na ₂ O	–5.63	–5.30	–5.05	–4.94	–4.69	–4.49	–4.31	–4.80	–5.39	–4.47	–3.94	–3.52	–2.67
K ₂ O	–4.43	–4.43	–4.21	–4.06	–3.98	–3.91	–	–	–	–	–	–	–
NaAlO ₂	1.45	1.36	1.05	2.14	2.13	2.14	2.12	2.64	2.84	2.75	2.67	1.82	2.73
BaAl ₂ O ₄	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–0.61	–0.74	–0.88	–0.99
CaAl ₂ O ₄	2.08	1.30	0.63	–0.14	–0.53	–1.11	–1.47	–2.27	–2.26	–2.28	–2.33	–2.40	–2.44
MgAl ₂ O ₄	1.56	0.81	–0.45	–1.04	–1.54	–2.48	–2.79	–2.92	–2.98	–2.99	–3.01	–3.06	–3.09
MnAl ₂ O ₄	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Table D3

D_i constants for $x_{\text{SiO}_2} \in [0.55; 0.65]$

T	1473	1523	1573	1623	1673	1723	1773	1823	1873	1923	1973	2023	2073
SiO ₂	5.35	5.00	4.66	4.33	4.02	3.73	3.46	3.19	2.95	2.72	2.48	2.29	2.07
TiO ₂	–	–1.82	–1.88	–1.92	–1.85	–1.81	–1.78	–	–	–	–	–	–
FeO	–1.34	–2.34	–2.59	–2.69	–2.88	–2.83	–1.99	–3.13	–	–	–	–	–
MnO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
MgO	–1.35	–1.39	–1.59	–1.82	–1.85	–1.64	–1.71	–2.03	–1.75	–1.69	–1.61	–1.55	–1.40
CaO	–1.12	–1.86	–1.99	–2.29	–2.41	–2.40	–2.40	–2.46	–2.35	–2.33	–2.25	–2.24	–2.12
SrO	–	–	–	–	–	–	–2.17	–2.14	–2.13	–2.11	–2.03	–2.05	–1.95
BaO	–	–	–	–	–	–	–2.17	–2.08	–2.17	–2.17	–2.14	–2.03	–1.98
Li ₂ O	–4.63	–4.45	–4.26	–4.07	–3.91	–3.66	–3.51	–3.56	–	–	–	–	–
Na ₂ O	–3.77	–3.68	–3.61	–3.48	–3.47	–3.41	–3.38	–3.74	–3.53	–2.36	–1.61	–	–
K ₂ O	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
NaAlO ₂	2.45	2.31	2.68	2.57	3.25	3.04	2.84	2.82	2.58	2.34	2.14	1.64	1.61
BaAl ₂ O ₄	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CaAl ₂ O ₄	0.80	1.08	0.32	0.31	–0.10	–0.61	–0.71	–1.26	–1.32	–1.37	–1.39	–1.52	–1.56
MgAl ₂ O ₄	–0.17	–1.52	–0.79	–0.97	–0.74	–1.52	–1.65	–1.57	–1.95	–2.05	–2.08	–2.16	–2.12
MnAl ₂ O ₄	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Table D4
 D_i constants for $x_{\text{SiO}_2} \in [0.45; 0.55]$

T	1473	1523	1573	1623	1673	1723	1773	1823	1873	1923	1973	2023	2073
SiO ₂	4.49	4.13	3.78	3.46	3.15	2.87	2.61	2.34	2.12	1.87	1.64	1.45	1.24
TiO ₂	–	–	–0.50	–1.63	–1.76	–1.06	–	–	–	–	–	–	–
FeO	–1.48	–1.82	–2.09	–2.35	–2.08	–2.81	–2.34	–2.87	–	–	–	–	–
MnO	–	–	–1.78	–0.98	–1.98	–	–	–	–	–	–	–	–
MgO	–1.22	–1.18	–1.33	–1.27	–1.25	–1.17	–1.01	–0.76	–0.97	–1.06	–0.93	–0.95	–0.90
CaO	–0.61	–0.62	–0.77	–0.96	–1.12	–1.18	–1.25	–1.33	–1.35	–1.47	–1.38	–1.38	–1.30
SrO	–	–	–	–	–	–	–1.17	–1.13	–1.12	–1.09	–1.07	–1.08	–1.04
BaO	–	–	–	–	–	–	–1.22	–1.22	–1.23	–1.20	–1.15	–1.12	–1.04
Li ₂ O	–3.37	–3.30	–3.17	–3.04	–2.92	–2.80	–2.58	–2.61	–	–	–	–	–
Na ₂ O	–3.20	–3.13	–2.98	–2.97	–2.88	–2.75	–2.65	–1.68	–1.52	–	–	–	–
K ₂ O	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
NaAlO ₂	4.84	4.60	4.33	4.16	3.97	3.54	3.29	2.91	2.67	2.36	2.16	1.94	1.77
BaAl ₂ O ₄	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CaAl ₂ O ₄	3.08	2.64	2.11	1.52	1.19	0.76	0.32	–0.11	–0.22	–0.46	–0.50	–0.56	–0.56
MgAl ₂ O ₄	–	1.52	1.12	1.19	1.50	2.75	1.05	–0.52	–0.28	–0.03	–0.07	0.20	0.40
MnAl ₂ O ₄	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Table D5
 D_i constants for $x_{\text{SiO}_2} \in [0.35; 0.45]$

T	1473	1523	1573	1623	1673	1723	1773	1823	1873	1923	1973	2023	2073
SiO ₂	2.32	2.18	2.05	1.92	1.81	1.69	1.59	1.48	1.39	1.3	1.22	1.14	1.05
TiO ₂	–0.96	–0.48	–0.35	–0.57	0.38	0.86	0.83	–	–	–	–	–	–
FeO	–0.79	–1.09	–1.22	–1.25	–1.39	–1.30	–1.75	–1.74	–	–	–	–	–
MnO	–1.56	–1.35	–1.31	–1.38	–1.08	–0.93	–0.96	–	–	–	–	–	–
MgO	0.87	0.66	1.05	0.23	–0.15	–0.33	–0.53	0.64	0.49	0.46	–0.32	–0.45	–0.49
CaO	0.32	0.32	0.31	0.17	–0.07	0.31	–0.51	–1.51	–1.44	–1.02	–1.12	–1.22	–1.27
SrO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
BaO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Li ₂ O	–1.87	–1.85	–1.90	–1.94	–1.98	–2.02	–2.04	–	–	–	–	–	–
Na ₂ O	–1.93	–2.04	–2.09	–2.14	–2.17	–2.18	–2.22	–2.26	–	–	–	–	–
K ₂ O	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
NaAlO ₂	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
BaAl ₂ O ₄	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CaAl ₂ O ₄	3.73	3.34	2.91	2.36	2.34	1.87	1.74	2.54	2.82	3.07	2.91	2.76	2.42
MgAl ₂ O ₄	–	–	–	–	–	–	–	1.51	0.55	–0.99	–0.10	0.11	0.06
MnAl ₂ O ₄	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

A.3. SciGlass Rechercheergebnisse synthetischer Schlacken im System SiO₂-Al₂O₃-Na₂O-K₂O

In diesem Teil des Anhangs sind die Ergebnisse der SciGlass-Recherche für synthetische Schlacken des Systems SiO₂-Al₂O₃-Na₂O-K₂O detailliert in tabellarischer Form aufgeführt. Für jedes System sind die SciGlass-IDs aufgeführt, unter denen Messdaten gefunden wurden. Mit Hilfe dieser ID lässt sich der entsprechende Eintrag in der SciGlass-Datenbank wieder finden. In den letzten beiden Spalten wird der Autor und das Jahr der Veröffentlichung, aus der die Messpunkte stammen, genannt. Die Tabellen sind nach der SciGlass-ID sortiert.

A. Anhang

SiO₂

SciGlass-ID	Autor	Jahr
204	Volarovich	1936
1440	Pavlova	1975
1921	Bihuniak	1979
1924	Schultz	1972
1967	Urbain	1982
2874	Fontana	1966
2948	Brown	1959
2954	Mazurin	1975
2955	Bihuniak	1983
2957	Gusakova	1974
2958	Hlavac	1968
2960	Leko	1977
2962	Leko	1975
2964	Scherer	1983
2965	Tajima	1994
2966	Weiss	1984
2971	Leko	1974
2972	Mazurin	1974
2973	Solomin	1940
2974	Bruckner	1964
2975	Dunn	1968
2976	Hofmaier	1968
2977	Yovanovitch	1961
2978	Bowen	1978
4224	Elmer	1965
4878	Leko	1973
5581	Leko	1996
5638	Whitworth	1970
5648	Clasen	1992
5650	Ohashi	1992
5651	Shiraki	1993
7020	Loryan	1976
7833	Kimura	1969
11018	Glass Tubes and	1970
11709	Corning Glass W	1978
12278	Donnadieu	1988
12402	Donnadieu	1985

SciGlass-ID	Autor	Jahr
12682	Paek	1988
12785	Toshiba Ceramic	1979
13201	Bockris	1955
13231	Amosov	1978
13232	Aslanov	1974
13236	Leko	1975
13257	Hagy	1963
13260	Mazurin	1975
13262	Leko	1976
13263	Leko	1976
13311	Hnida	1962
13368	Inuzuka	1939
13400	Owens-Illinois	1966
13479	Mackenzie	1962
13525	Bruisten	1991
13962	Clasen	1995
13963	Clasen	1995
14095	Prod'homme	1960
14572	Doladugina	1993
16585	Solomin	1941
17010	Gulati	1998
23881	Volarovich	1937
24613	Tsukuma	2000
28816	Sakai	2002
29795	Akiyama	1992
32142	Sakaguchi	1996
33523	Yamahara	2004

Al₂O₃

SciGlass-ID	Autor	Jahr
5886	Kozakevitch	1960
12406	Elyutin	1969
14045	Zubarev	1969
14103	Elyutin	1971

A. Anhang

System SiO₂-Al₂O₃

SciGlass-ID	Autor	Jahr
1967	Urbain	1982
2676	Leko	1977
2948	Brown	1959
2967	Leko	1977
3464	Kozakevitch	1960
5638	Whitworth	1970
12406	Elyutin	1969
13232	Aslanova	1974
13261	Leko	1980

System SiO₂-Na₂O

SciGlass-ID	Autor	Jahr
270	Stolyar	1992
316	Fontana	1979
410	Mazurin	1970
443	Washburn	1924
1615	Schnaus	1976
2115	Lapp	1986
2123	Marcheschi	1985
2711	Taylor	1937
2712	Preston	1938
2713	Preston	1938
2714	Lillie	1939
2715	Moriya	1939
2717	Skornyakov	1941
2719	Bockris	1955
2722	Eipeltauer	1955
2725	Shvaiko-Shvaiko	1971
2726	Ammar	1977
2967	Leko	1977
3037	Zak	1952
3040	Coenen	1964
3041	Lorey	1965

SciGlass-ID	Autor	Jahr
3042	Meiling	1967
3143	Heidtkamp	1936
3144	Shartsis	1952
3182	Li	1970
3183	Boow	1942
3280	Suzuki	1980
3315	Petrovskii	1956
3316	Nemilov	1969
3319	Evstropiev	1940
3324	Pospelov	1954
3328	Shvaiko-Shvaiko	1968
3329	Ivanov	1969
3344	Hoffman	1952
4067	LaCourse	1978
4109	Ota	1991
4165	Matusita	1973
4207	Kawahara	1977
4587	Mizoguchi	1986
4590	Shiraishi	1987
6913	Kuroda	1982
6916	Moriya	1970
6918	Moriya	1970
6943	Sang-Ki	1993
7208	Ota	1995
7240	Vasiljev	1977
7366	Jewell	1992
7534	El-Badry	1982
7548	Komleva	1971
8101	Kim	1995
9332	Hunold	1980
9528	Jenckel	1938
9640	Suzuki	1981
10314	Ota	1988
11111	Yanishevskii	1961
11536	Scarfe	1979
11536	Scarfe	1979
12226	Sycheva	1998
12579	Urbain	1985
12642	Klyuev	1969

A. Anhang

SciGlass-ID	Autor	Jahr
13528	Shiraishi	1988
13784	Kawahara	1979
13792	Kou	1978
14208	Ehrt	1997
14512	Gehlhoff	1925
14673	Plumat	1956
14867	El-Badry	1981
15031	Lotto	1966
15032	Lotto	1969
15040	Mazurin	1970
15480	Evstropiev	1968
15688	Leontjeva	1941
15759	Skryabin	1978
16022	Winter-Klein	1965
16487	Sumita	1980
16489	Sumita	1980
16576	Yamane	1989
16587	Sumita	1982
16761	Wright	2000
17369	Grussaute	2000
20556	Dinulescu	2000
20565	Dingwell	1998
20572	Appen	1964
23643	Jarry	2001
24151	Ehrt	2001
24324	Sipp	2002
24389	Liska	1996
26120	Dumbaugh	1978
29210	Dingwell	1990
30132	Ji-Jian	1986
30321	Klyuev	2006
31751	Endell	1940

System $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$

SciGlass-ID	Autor	Jahr
310	Startsev	1978
1955	Mizoguchi	1982
2116	Lapp	1986
2129	Asayama	1993
2719	Bockris	1955
2723	Eipeltauer	1960
2726	Ammar	1977
3043	Volarovich	1934
3144	Shartsis	1952
3316	Nemilov	1969
3330	Ivanov	1969
3561	Saringyulyan	1970
4109	Ota	1991
4165	Matusita	1973
7208	Ota	1995
7240	Vasiljev	1977
8101	Kim	1995
9508	Pohlmann	1976
14867	El-Badry	1981
17446	Kawakami	1996
20355	Shiraishi	2001
20572	Appen	1964
24004	Lisenenkov	1969
26120	Dumbaugh	1978
30132	Ji-Jian	1986
31751	Endell	1940

System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$

SciGlass-ID	Autor	Jahr
268	Karapetyan	1984
366	Makhnavevskii	1972
2012	Dingwell	1986
2561	Kozu	1944

A. Anhang

SciGlass-ID	Autor	Jahr
2563	Kani	1935
2583	Hummel	1985
3324	Pospelov	1954
3343	Ermolaeva	1951
3344	Hoffman	1952
3483	Urbain	1982
4589	N'Dala	1981
4669	Cranmer	1981
6867	Sakka	1981
6868	Sakka	1981
7366	Jewell	1992
7534	El-Badry	1982
8101	Kim	1995
9332	Hunold	1980
10212	Topping	1973
13792	Kou	1978
13950	Spanoudis	1969
14512	Gehlhoff	1925
14792	Neuville	1990
15031	Lotto	1966
15295	Brearley	1986
15479	Cranmer	1981
15620	Stein	1993
15714	Volarovich	1936
16152	Belyaev	1965
16310	Evans	1965
20460	Sipp	2001
20564	Toplis	1996
23931	Giffen	1972
24324	Sipp	2002
24422	Romano	2001
24506	Toplis	1998
28624	Roskosz	2004
28793	Toplis	1997
29425	Scarfe	1986
32790	Webb	2004
32793	Zimova	2006
32947	Suzuki	2002

System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$

SciGlass-ID	Autor	Jahr
2563	Kani	1935
3353	Mizoguchi	1982
3483	Urbain	1982
4589	N'Dala	1981
8101	Kim	1995
14792	Neuville	1990
24422	Romano	2001

System $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$

SciGlass-ID	Autor	Jahr
3315	Petrovskii	1956
3316	Nemilov	1969
3317	Sasek	1975
7240	Vasiljev	1977
8101	Kim	1995
16338	Mackenzie	1957
26120	Dumbaugh	1978

System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$

SciGlass-ID	Autor	Jahr
1929	Keshishyan	1975
2563	Kani	1935
3483	Urbain	1982
8101	Kim	1995
13417	Mochel	1967
15618	Hess	1996
17007	Dingwell	1998
17008	Dingwell	1993
17009	Hess	1995
24529	Dingwell	1992

A. Anhang

SciGlass-ID	Autor	Jahr
28212	Giordano	2003
28241	Webb	1996
28633	Dingwell	1998
32698	Schulze	1996

A.4. Literaturübersicht realer Schlacken unter reduzierenden Bedingungen

Jahr	Autor	Literatur	Kohle	Land	T _{max} [°C]	T _{min} [°C]	ln(η_{\min}) [Pas]	(η_{\max}) [Pas]
1984	Quon et al.	[52]	3 Proben	Kanada	1780	1320	-0,22	6,31
1984	Streeter et al.	[53]	Atlantic Richfield	USA	1313	1195	0,99	2,84
1984	Streeter et al.	[53]	Baukol-Noonan	USA	1284	1164	1,41	4,00
1984	Streeter et al.	[53]	Beulah	USA	1425	1304	1,34	3,53
1984	Streeter et al.	[53]	Big Brown	USA	1388	1307	0,88	1,77
1984	Streeter et al.	[53]	Big Horn	USA	1319	1192	2,20	3,48
1984	Streeter et al.	[53]	Black Butte	USA	1476	1257	2,64	5,82
1984	Streeter et al.	[53]	Burns & McDonnell	USA	1481	1317	1,39	3,30
1984	Streeter et al.	[53]	Colstrip	USA	1456	1351	0,59	2,32
1984	Streeter et al.	[53]	Decker	USA	1286	1174	1,61	3,36
1984	Streeter et al.	[53]	Emery	USA	1407	1290	1,67	3,74
1984	Streeter et al.	[53]	Gascoyne	USA	1348	1225	0,92	2,32
1984	Streeter et al.	[53]	Indian Head	USA	1423	1376	1,57	2,10
1984	Streeter et al.	[53]	Kennerer	USA	1447	1323	2,17	4,08
1984	Streeter et al.	[53]	Martin Lake	USA	1471	1272	1,46	4,15
1984	Streeter et al.	[53]	Naughton	USA	1499	1401	4,58	5,82
1984	Streeter et al.	[53]	Rockdale	USA	1472	1361	0,92	2,35
1984	Streeter et al.	[53]	Sarpy Creek	USA	1481	1366	1,72	3,09
1985	Quon et al.	[54]	5 Proben	Kanada	1720	1400	-1,20	4,50
1985	Quon et al.	[54]	1 Probe	Kanada	1680	1450	2,08	4,09
1985	Quon et al.	[54]	2 Proben	Kanada	1620	1320	-1,20	1,50
1985	Schobert et al.	[55]	Gascoyne	USA	1350	1175	0,92	5,39
1985	Schobert et al.	[55]	Indian Head	USA	1420	1210	0,69	5,01
1991	Nowok et al.	[56]	Beulah	USA	1440	1220	<2,30	5,39
1991	Nowok et al.	[56]	Illinois #6 + Limestone	USA	1490	1370	3,69	4,79
1991	Nowok et al.	[56]	Pittsburgh #8 + Limestone	USA	1460	1340	3,91	5,99

Jahr	Autor	Literatur	Kohle	Land	T _{max} [°C]	T _{min} [°C]	ln(η _{min}) [Pas]	(η _{max}) [Pas]
1995	Nowok	[57]	Illinois #6	USA	1440	1300	3,00	4,94
1995	Nowok	[57]	Rochelle	USA	1390	1180	0,69	3,40
1995	Oh et al.	[58]	Pittsburgh #8	USA	1500	1260	<2,30	5,70
1995	Oh et al.	[58]	PMA	USA	1500	1320	<2,30	5,48
1995	Oh et al.	[58]	PMB	USA	1500	1200	<2,30	5,60
1995	Oh et al.	[58]	SUFCo	USA	1500	1250	2,30	5,56
1996	Brooker et al.	[59]	Pittsburgh #8	USA	1460	1200	<2,30	4,61
1996	Brooker et al.	[59]	SUFCo	USA	1475	1240	3,00	5,63
1996	Hurley et al.	[60]	Powder River Basin	USA	1400	1150	<0,69	3,22
1996	Hurst et al.	[61]	Probe C	Australien	1550	1425	2,30	3,69
1997	Kim et al.	[62]	Alaska	USA	1550	1325	<1,00	5,99
1997	Kim et al.	[62]	Datong	China	1600	1300	<1,00	5,89
1998	Groen et al.	[63]	Pittsburgh #8	USA	1450	1180	<2,30	5,01
1998	Groen et al.	[63]	SUFCo	USA	1490	1180	2,30	5,97
1999	Hurst et al.	[64]	85 Proben	Australien	1500	1450	-1,08	5,30
2001	Cho et al.	[65]	Alaska Usibelli	USA	1500	1300	2,30	5,08
2001	Cho et al.	[65]	Cyprus	USA	1600	1375	3,00	5,99
2005	Folkedahl et al.	[66]	Rochelle	unbekannt	1450	1300	<1,00	3,00
2007	Yun et al.	[67]	Adaro	Indonesien	1550	1350	<3,00	5,39
2007	Yun et al.	[67]	Curragh	Australien	1550	1300	<3,00	<3,00
2007	Yun et al.	[67]	Cyprus	USA	1575	1275	3,69	6,40
2007	Yun et al.	[67]	Datong	China	1600	1375	3,69	5,86
2007	Yun et al.	[67]	Denisovsky	Russland	1525	1375	4,61	6,21

Jahr	Autor	Literatur	Kohle	Land	T _{max} [°C]	T _{min} [°C]	ln(η_{\min}) [Pas]	(η_{\max}) [Pas]
2007	Yun et al.	[67]	Drayton	Australien	1500	1250	3,69	6,80
2007	Yun et al.	[67]	Kideco	Indonesien	1550	1400	3,69	5,70
2007	Yun et al.	[67]	Usibelli	USA	1475	1325	<3,00	5,60
2008	Matyas et al.	[68]	Pittsburgh #8	USA	1425	1375	1,61	3,22
2008	Matyas et al.	[68]	Pocahontas #3	USA	1475	1200	<1,61	3,40
2008	Matyas et al.	[68]	Wyoming PRB	USA	1525	1150	<1,61	4,25
2008	Matyas et al.	[69]	Pittsburgh #8	USA	1480	1375	2,01	3,11
2008	Matyas et al.	[69]	Pocahontas #3	USA	1450	1200	0,92	2,86
2008	Matyas et al.	[69]	Wyoming PRB	USA	1460	1210	0,92	3,48
2010	Li et al.	[70]	Babao	China	1750	1300	2,30	7,82
2010	Li et al.	[70]	Binggou	China	1750	1350	1,61	6,68
2010	Li et al.	[70]	Dat'ai	China	1700	1400	3,00	7,60
2010	Li et al.	[70]	Huangxian	China	1550	1200	0,69	6,91
2010	Li et al.	[70]	HuaTing	China	1750	1475	0,69	4,38
2010	Li et al.	[70]	Lingzi	China	1750	1400	1,10	6,21
2010	Li et al.	[70]	Lujiazui	China	1650	1400	2,30	6,91
2010	Li et al.	[70]	Maoming	China	1750	1450	1,79	6,68
2010	Li et al.	[70]	Pingwang	China	1750	1300	1,10	6,91
2010	Li et al.	[70]	Pingzhuang	China	1750	1300	2,08	6,68
2010	Li et al.	[70]	ShenHua	China	1550	1050	0,00	6,68
2010	Li et al.	[70]	ShenMu	China	1600	1250	0,69	6,91
2010	Li et al.	[70]	Shulan	China	1775	1600	1,95	10,82
2010	Li et al.	[70]	Yima	China	1700	1400	3,00	7,60
2010	Li et al.	[70]	Yuanhua	China	1700	1350	0,00	6,55
2010	Li et al.	[70]	Yungang	China	1450	1000	1,61	8,01
2010	Li et al.	[70]	Zaotian	China	1600	1300	1,61	6,91

A.5. Detaillierte Informationen über die bei der Modellentwicklung zum Einsatz kommenden Datenpunkte

In diesem Teil des Anhangs sind alle in SciGlass gefundenen Messergebnisse, die für die Modellentwicklung verwendet werden, detailliert in tabellarischer Form aufgeführt. Für jeden Datenpunkt ist die Zusammensetzung, die Temperatur, die gemessene Viskosität, der Autor, das Veröffentlichungsjahr, die SciGlass-ID und die in SciGlass genannte Quelle angegeben. Die Tabellen sind nach den Werten der ersten Spalte aufsteigend sortiert. Bei gleichen Werten wird, wenn vorhanden, nach den weiteren Bestandteilen und dann nach Temperatur, Viskosität und zuletzt der SciGlass-ID sortiert.

SiO₂

SiO ₂ [wt%]	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
1,000	1724,0	15,66	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1726,0	14,99	Clasen	1992	5648	[129]
1,000	1727,0	14,58	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1731,0	15,70	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1732,0	14,46	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1734,0	15,47	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1734,0	15,52	Bruisten	1991	13525	[87]
1,000	1734,9	14,74	Gusakova	1974	2957	[130]
1,000	1739,0	15,38	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1740,0	15,06	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1740,0	15,52	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1741,0	15,06	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1741,0	15,08	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1743,0	14,00	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1743,0	14,97	Gusakova	1974	2957	[130]
1,000	1744,0	14,94	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1745,0	14,25	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1746,0	15,04	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1747,0	15,24	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1747,1	14,05	Gusakova	1974	2957	[130]
1,000	1749,0	13,91	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1749,0	15,17	Bruisten	1991	13525	[87]

SiO ₂ [wt%]	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
1,000	1749,0	15,36	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1754,0	14,83	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1755,0	15,24	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1756,0	14,67	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1759,0	14,09	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1759,0	15,06	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1761,0	15,06	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1762,0	15,04	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1763,0	14,30	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1763,5	13,82	Gusakova	1974	2957	[130]
1,000	1765,0	14,30	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1765,0	14,71	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1765,0	14,99	Clasen	1992	5648	[129]
1,000	1767,0	14,90	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1768,0	13,95	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1770,0	14,48	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1773,0	14,76	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1775,0	14,81	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1776,0	13,59	Urbain	1982	1967	[86]
1,000	1776,0	13,59	Gusakova	1974	2957	[130]
1,000	1776,0	13,82	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1777,0	14,07	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1778,0	13,52	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1779,0	14,11	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1779,0	14,67	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1780,0	13,84	Clasen	1992	5648	[129]
1,000	1780,2	13,35	Gusakova	1974	2957	[130]
1,000	1780,2	13,59	Gusakova	1974	2957	[130]
1,000	1780,2	14,05	Gusakova	1974	2957	[130]
1,000	1782,0	14,30	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1783,0	13,72	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1785,0	14,62	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1786,0	14,55	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1788,0	14,35	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1788,0	14,51	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1791,0	13,63	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1791,0	13,86	Clasen	1992	5648	[129]
1,000	1791,0	13,91	Weiss	1984	2966	[128]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
1,000	1791,0	13,93	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1792,0	14,11	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1792,0	14,41	Bruisten	1991	13525	[87]
1,000	1795,0	12,71	Clasen	1992	5648	[129]
1,000	1795,0	14,28	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1795,0	14,37	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1796,0	14,39	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1797,0	14,37	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1797,2	13,12	Gusakova	1974	2957	[130]
1,000	1800,0	13,75	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1800,0	13,77	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1800,0	13,91	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1800,0	14,37	Pavlova	1975	1440	[132]
1,000	1803,0	14,18	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1808,0	14,11	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1808,0	14,21	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1809,0	14,16	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1810,0	13,61	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1810,0	13,63	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1810,0	13,82	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1810,0	14,09	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1811,0	14,05	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1814,5	13,79	Dunn	1968	2975	[88]
1,000	1815,0	13,86	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1816,0	13,98	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1817,0	13,52	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1818,0	13,47	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1818,9	13,82	Gusakova	1974	2957	[130]
1,000	1823,0	13,42	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1823,3	14,16	Shiraki	1993	5651	[133]
1,000	1824,0	13,42	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1825,0	14,02	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1827,7	12,66	Gusakova	1974	2957	[130]
1,000	1828,0	13,17	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1829,0	13,79	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1830,0	13,84	Clasen	1992	5648	[129]
1,000	1832,0	12,92	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1836,0	13,70	Bruckner	1964	2974	[131]

SiO ₂ [wt%]	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
1,000	1838,0	12,80	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1839,0	13,65	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1841,0	13,72	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1843,0	12,96	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1848,0	13,56	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1850,0	12,43	Gusakova	1974	2957	[130]
1,000	1852,0	12,69	Clasen	1992	5648	[129]
1,000	1852,0	13,01	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1854,5	13,54	Shiraki	1993	5651	[133]
1,000	1855,0	13,45	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1856,0	12,94	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1857,0	12,80	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1858,0	12,73	Clasen	1992	5648	[129]
1,000	1859,0	13,33	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1863,0	13,26	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1863,6	13,12	Gusakova	1974	2957	[130]
1,000	1863,6	13,12	Gusakova	1974	2957	[130]
1,000	1868,0	12,66	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1869,0	13,22	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1870,0	12,35	Urbain	1982	1967	[86]
1,000	1870,0	12,76	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1871,0	12,76	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1871,0	13,24	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1873,0	13,06	Bruisten	1991	13525	[87]
1,000	1875,0	12,57	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1877,0	13,12	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1879,0	13,08	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1882,0	12,48	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1882,0	12,60	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1884,0	12,57	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1888,0	12,92	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1890,0	12,73	Clasen	1992	5648	[129]
1,000	1891,0	12,36	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1891,0	13,03	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1891,4	13,01	Shiraki	1993	5651	[133]
1,000	1893,0	12,46	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1895,0	11,58	Clasen	1992	5648	[129]
1,000	1895,0	12,43	Weiss	1984	2966	[128]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
1,000	1896,0	12,43	Paek	1988	12682	[134]
1,000	1896,0	12,85	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1898,0	12,80	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1898,0	12,89	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1900,0	12,36	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1900,0	12,57	Bruisten	1991	13525	[87]
1,000	1902,0	12,32	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1903,0	12,69	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1904,0	12,80	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1906,0	12,66	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1910,0	12,20	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1910,0	12,60	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1912,0	12,20	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1914,0	12,07	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1915,0	12,18	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1918,0	11,90	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1919,0	12,16	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1919,0	12,62	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1922,0	12,57	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1923,0	12,41	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1924,7	12,46	Dunn	1968	2975	[88]
1,000	1924,7	12,46	Shiraki	1993	5651	[133]
1,000	1929,0	12,09	Bruisten	1991	13525	[87]
1,000	1931,0	11,88	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1932,0	12,48	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1934,0	11,58	Clasen	1992	5648	[129]
1,000	1934,0	11,58	Clasen	1992	5648	[129]
1,000	1938,0	11,84	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1938,0	12,23	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1938,0	12,36	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1944,0	11,72	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1944,1	12,20	Gusakova	1974	2957	[130]
1,000	1946,0	12,27	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1949,0	12,20	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1949,1	11,81	Paek	1988	12682	[134]
1,000	1953,0	12,02	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1954,0	12,04	Shiraki	1993	5651	[133]
1,000	1955,0	11,56	Clasen	1992	5648	[129]

SiO ₂ [wt%]	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
1,000	1955,0	11,63	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1956,0	11,88	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1957,0	12,18	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1958,0	11,97	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1960,0	12,04	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1963,0	11,49	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1964,0	11,03	Urbain	1982	1967	[86]
1,000	1964,0	11,88	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1964,0	12,11	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1964,0	12,18	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1970,0	11,37	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1970,0	11,49	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1972,0	11,65	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1972,0	11,90	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1974,0	11,84	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1974,0	12,04	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1975,0	11,33	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1975,0	11,37	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1975,0	11,72	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1979,0	11,35	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1980,0	11,35	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1980,0	11,65	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1980,0	11,79	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1982,0	11,19	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1984,2	11,54	Shiraki	1993	5651	[133]
1,000	1985,0	11,49	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1989,0	11,05	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1989,0	11,54	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1989,0	11,70	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1990,0	11,28	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1992,0	11,81	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	1995,0	11,24	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1995,0	11,61	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1996,0	11,35	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1997,0	11,49	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1999,0	11,14	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	1999,6	11,19	Paek	1988	12682	[134]
1,000	2003,0	10,41	Clasen	1992	5648	[129]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
1,000	2004,0	11,12	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	2006,0	11,24	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	2007,0	11,67	Bruckner	1964	2974	[131]
1,000	2011,0	11,17	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	2012,0	10,41	Clasen	1992	5648	[129]
1,000	2015,2	10,78	Dunn	1968	2975	[88]
1,000	2017,0	11,10	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	2019,0	10,41	Clasen	1992	5648	[129]
1,000	2019,0	10,43	Clasen	1992	5648	[129]
1,000	2021,0	11,08	Weiss	1984	2966	[128]
1,000	2052,4	10,20	Dunn	1968	2975	[88]
1,000	2052,4	10,64	Paek	1988	12682	[134]
1,000	2061,0	9,78	Urbain	1982	1967	[86]
1,000	2085,0	9,14	Bowen	1978	2978	[135]
1,000	2096,5	10,09	Paek	1988	12682	[134]
1,000	2102,1	9,92	Dunn	1968	2975	[88]
1,000	2142,3	8,82	Dunn	1968	2975	[88]
1,000	2148,2	9,58	Paek	1988	12682	[134]
1,000	2163,0	8,76	Urbain	1982	1967	[86]
1,000	2190,0	8,04	Bowen	1978	2978	[135]
1,000	2220,6	8,01	Dunn	1968	2975	[88]
1,000	2240,0	7,55	Bowen	1978	2978	[135]
1,000	2258,5	7,62	Dunn	1968	2975	[88]
1,000	2268,0	7,75	Urbain	1982	1967	[86]
1,000	2310,0	6,76	Bowen	1978	2978	[135]
1,000	2382,0	6,74	Urbain	1982	1967	[86]
1,000	2482,0	5,82	Urbain	1982	1967	[86]

Al₂O₃

Al ₂ O ₃ [wt%]	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
1,000	2055,0	-3,19	Urbain	1982	Daten von A. Kondratiev erhalten	
1,000	2075,0	-3,15	Urbain	1982	Daten von A. Kondratiev erhalten	
1,000	2094,0	-3,17	Urbain	1982	Daten von A. Kondratiev erhalten	
1,000	2106,0	-3,19	Urbain	1982	Daten von A. Kondratiev erhalten	
1,000	2109,0	-3,30	Urbain	1982	Daten von A. Kondratiev erhalten	

Al ₂ O ₃ [wt%]	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
1,000	2127,0	-3,24	Urbain	1982	Daten von A. Kondratiev erhalten	
1,000	2136,0	-3,27	Urbain	1982	Daten von A. Kondratiev erhalten	
1,000	2137,0	-3,30	Urbain	1982	Daten von A. Kondratiev erhalten	
1,000	2154,0	-3,27	Urbain	1982	Daten von A. Kondratiev erhalten	
1,000	2172,0	-3,24	Urbain	1982	Daten von A. Kondratiev erhalten	
1,000	2209,0	-3,35	Urbain	1982	Daten von A. Kondratiev erhalten	
1,000	2213,0	-3,41	Urbain	1982	Daten von A. Kondratiev erhalten	
1,000	2255,0	-3,44	Urbain	1982	Daten von A. Kondratiev erhalten	
1,000	2280,0	-3,47	Urbain	1982	Daten von A. Kondratiev erhalten	
1,000	2285,0	-3,58	Urbain	1982	Daten von A. Kondratiev erhalten	

System SiO₂-Al₂O₃

SiO ₂ [wt%]	Al ₂ O ₃ [wt%]	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,159	0,841	2000,0	-2,56	Elyutin	1969	12406	[89]
0,159	0,841	2050,0	-2,75	Elyutin	1969	12406	[89]
0,159	0,841	2100,0	-2,92	Elyutin	1969	12406	[89]
0,159	0,841	2150,0	-3,10	Elyutin	1969	12406	[89]
0,159	0,841	2200,0	-3,26	Elyutin	1969	12406	[89]
0,159	0,841	2250,0	-3,40	Elyutin	1969	12406	[89]
0,159	0,841	2300,0	-3,54	Elyutin	1969	12406	[89]
0,159	0,841	2350,0	-3,65	Elyutin	1969	12406	[89]
0,298	0,702	1950,0	-2,41	Kozakevitch	1960	3464	[136]
0,298	0,702	1950,0	-2,35	Elyutin	1969	12406	[89]
0,298	0,702	2000,0	-2,53	Kozakevitch	1960	3464	[136]
0,298	0,702	2000,0	-2,51	Elyutin	1969	12406	[89]
0,298	0,702	2050,0	-2,67	Elyutin	1969	12406	[89]
0,298	0,702	2050,0	-2,66	Kozakevitch	1960	3464	[136]
0,298	0,702	2100,0	-2,83	Elyutin	1969	12406	[89]
0,298	0,702	2100,0	-2,81	Kozakevitch	1960	3464	[136]
0,298	0,702	2150,0	-3,00	Elyutin	1969	12406	[89]
0,298	0,702	2200,0	-3,16	Elyutin	1969	12406	[89]
0,298	0,702	2250,0	-3,31	Elyutin	1969	12406	[89]
0,298	0,702	2300,0	-3,44	Elyutin	1969	12406	[89]
0,298	0,702	2350,0	-3,58	Elyutin	1969	12406	[89]
0,300	0,700	1953,0	-2,27	Urbain	1982	1967	[86]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	Al ₂ O ₃	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,300	0,700	2003,0	-2,46	Urbain	1982	1967	[86]
0,300	0,700	2053,0	-2,63	Urbain	1982	1967	[86]
0,300	0,700	2103,0	-2,81	Urbain	1982	1967	[86]
0,300	0,700	2154,0	-2,97	Urbain	1982	1967	[86]
0,300	0,700	2204,0	-3,12	Urbain	1982	1967	[86]
0,421	0,579	1950,0	-1,93	Elyutin	1969	12406	[89]
0,421	0,579	2000,0	-2,07	Elyutin	1969	12406	[89]
0,421	0,579	2050,0	-2,21	Elyutin	1969	12406	[89]
0,421	0,579	2100,0	-2,34	Elyutin	1969	12406	[89]
0,421	0,579	2150,0	-2,47	Elyutin	1969	12406	[89]
0,421	0,579	2200,0	-2,60	Elyutin	1969	12406	[89]
0,421	0,579	2250,0	-2,72	Elyutin	1969	12406	[89]
0,421	0,579	2300,0	-2,83	Elyutin	1969	12406	[89]
0,421	0,579	2350,0	-2,94	Elyutin	1969	12406	[89]
0,500	0,500	1853,0	-1,02	Urbain	1982	1967	[86]
0,500	0,500	1872,0	-1,12	Urbain	1982	1967	[86]
0,500	0,500	1880,0	-1,16	Urbain	1982	1967	[86]
0,500	0,500	1882,0	-1,18	Urbain	1982	1967	[86]
0,500	0,500	1904,0	-1,28	Urbain	1982	1967	[86]
0,500	0,500	1955,0	-1,54	Urbain	1982	1967	[86]
0,500	0,500	2005,0	-1,78	Urbain	1982	1967	[86]
0,500	0,500	2050,0	-1,99	Urbain	1982	1967	[86]
0,531	0,469	1850,0	-1,11	Kozakevitch	1960	3464	[136]
0,531	0,469	1900,0	-1,56	Elyutin	1969	12406	[89]
0,531	0,469	1900,0	-1,43	Kozakevitch	1960	3464	[136]
0,531	0,469	1950,0	-1,73	Elyutin	1969	12406	[89]
0,531	0,469	1950,0	-1,71	Kozakevitch	1960	3464	[136]
0,531	0,469	2000,0	-1,90	Kozakevitch	1960	3464	[136]
0,531	0,469	2000,0	-1,89	Elyutin	1969	12406	[89]
0,531	0,469	2050,0	-2,04	Kozakevitch	1960	3464	[136]
0,531	0,469	2050,0	-2,02	Elyutin	1969	12406	[89]
0,531	0,469	2100,0	-2,14	Elyutin	1969	12406	[89]
0,531	0,469	2100,0	-2,12	Kozakevitch	1960	3464	[136]
0,531	0,469	2150,0	-2,24	Elyutin	1969	12406	[89]
0,531	0,469	2200,0	-2,36	Elyutin	1969	12406	[89]
0,531	0,469	2250,0	-2,47	Elyutin	1969	12406	[89]
0,531	0,469	2300,0	-2,56	Elyutin	1969	12406	[89]
0,531	0,469	2350,0	-2,64	Elyutin	1969	12406	[89]

SiO ₂ [wt%]	Al ₂ O ₃	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,629	0,371	1850,0	-0,54	Kozakevitch	1960	3464	[136]
0,629	0,371	1900,0	-0,89	Kozakevitch	1960	3464	[136]
0,629	0,371	1950,0	-1,17	Kozakevitch	1960	3464	[136]
0,629	0,371	2000,0	-1,39	Kozakevitch	1960	3464	[136]
0,629	0,371	2050,0	-1,51	Kozakevitch	1960	3464	[136]
0,629	0,371	2100,0	-1,66	Kozakevitch	1960	3464	[136]
0,798	0,202	1703,0	3,46	Urbain	1982	1967	[86]
0,798	0,202	1753,0	3,00	Urbain	1982	1967	[86]
0,798	0,202	1803,0	2,56	Urbain	1982	1967	[86]
0,798	0,202	1853,0	2,13	Urbain	1982	1967	[86]
0,798	0,202	1903,0	1,73	Urbain	1982	1967	[86]
0,798	0,202	1953,0	1,35	Urbain	1982	1967	[86]
0,798	0,202	2002,0	1,00	Urbain	1982	1967	[86]
0,938	0,062	1653,0	8,99	Urbain	1982	1967	[86]
0,938	0,062	1703,0	8,27	Urbain	1982	1967	[86]
0,938	0,062	1753,0	7,58	Urbain	1982	1967	[86]
0,938	0,062	1803,0	6,95	Urbain	1982	1967	[86]
0,938	0,062	1853,0	6,29	Urbain	1982	1967	[86]
0,938	0,062	1903,0	5,71	Urbain	1982	1967	[86]
0,938	0,062	1953,0	5,14	Urbain	1982	1967	[86]
0,938	0,062	2003,0	4,60	Urbain	1982	1967	[86]

System SiO₂-Na₂O

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,400	0,600	1150,0	-3,13	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,400	0,600	1200,0	-3,25	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,400	0,600	1250,0	-3,38	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,400	0,600	1300,0	-3,50	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,400	0,600	1400,0	-3,73	Kawahara	1979	13784	[137]
0,453	0,547	1250,0	-1,89	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,453	0,547	1500,0	-2,90	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,459	0,541	1450,0	-3,61	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,459	0,541	1500,0	-3,96	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,459	0,541	1550,0	-4,20	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,490	0,510	1250,0	-0,92	Winter-Klein	1965	16022	[138]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,490	0,510	1500,0	-2,19	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,500	0,500	1100,0	-0,02	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,500	0,500	1160,0	-0,49	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,500	0,500	1200,0	-0,85	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,500	0,500	1200,0	-0,78	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,500	0,500	1250,0	-1,17	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,500	0,500	1250,0	-0,78	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,500	0,500	1260,0	-1,05	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,500	0,500	1300,0	-1,57	Scarfe	1979	11536	[140]
0,500	0,500	1300,0	-1,54	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,500	0,500	1350,0	-1,82	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,500	0,500	1400,0	-2,07	Kawahara	1979	13784	[137]
0,500	0,500	1400,0	-2,00	Kuroda	1982	6913	[141]
0,507	0,493	1100,0	-0,12	Preston	1938	2713	[91]
0,507	0,493	1150,0	-0,51	Preston	1938	2713	[91]
0,507	0,493	1200,0	-0,90	Preston	1938	2713	[91]
0,507	0,493	1250,0	-1,38	Preston	1938	2713	[91]
0,507	0,493	1300,0	-1,84	Preston	1938	2713	[91]
0,507	0,493	1350,0	-2,07	Preston	1938	2713	[91]
0,507	0,493	1400,0	-2,30	Preston	1938	2713	[91]
0,508	0,492	1450,0	-2,28	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,508	0,492	1500,0	-2,53	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,508	0,492	1550,0	-2,75	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,510	0,490	1250,0	-0,55	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,530	0,470	1100,0	1,38	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,530	0,470	1160,0	0,85	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,530	0,470	1200,0	0,54	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,530	0,470	1260,0	0,06	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,530	0,470	1300,0	-0,29	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,534	0,466	1100,0	0,76	Preston	1938	2712	[100]
0,534	0,466	1200,0	-0,14	Preston	1938	2712	[100]
0,534	0,466	1300,0	-0,94	Preston	1938	2712	[100]
0,534	0,466	1400,0	-1,57	Preston	1938	2712	[100]
0,538	0,462	1250,0	0,16	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,550	0,450	1250,0	0,55	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,550	0,450	1500,0	-1,27	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,556	0,444	1050,0	1,96	Preston	1938	2713	[91]
0,556	0,444	1100,0	1,45	Preston	1938	2713	[91]

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,556	0,444	1150,0	0,92	Preston	1938	2713	[91]
0,556	0,444	1200,0	0,41	Preston	1938	2713	[91]
0,556	0,444	1250,0	0,09	Preston	1938	2713	[91]
0,556	0,444	1300,0	-0,23	Preston	1938	2713	[91]
0,556	0,444	1350,0	-0,58	Preston	1938	2713	[91]
0,556	0,444	1400,0	-0,92	Preston	1938	2713	[91]
0,556	0,444	1450,0	-1,27	Preston	1938	2713	[91]
0,562	0,438	1450,0	-1,09	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,562	0,438	1500,0	-1,39	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,562	0,438	1550,0	-1,67	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,572	0,428	1000,0	3,37	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,572	0,428	1060,0	2,67	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,572	0,428	1100,0	2,26	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,572	0,428	1160,0	1,75	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,572	0,428	1200,0	1,41	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,572	0,428	1260,0	0,91	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,572	0,428	1300,0	0,56	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,579	0,421	1250,0	1,15	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,581	0,419	1000,0	3,32	Preston	1938	2712	[100]
0,581	0,419	1100,0	2,23	Preston	1938	2712	[100]
0,581	0,419	1200,0	1,27	Preston	1938	2712	[100]
0,581	0,419	1300,0	0,35	Preston	1938	2712	[100]
0,581	0,419	1400,0	-0,25	Preston	1938	2712	[100]
0,587	0,413	995,9	3,87	Lotto	1969	15032	[142]
0,587	0,413	1030,6	3,45	Lotto	1969	15032	[142]
0,587	0,413	1053,1	3,18	Lotto	1969	15032	[142]
0,587	0,413	1085,5	2,81	Lotto	1969	15032	[142]
0,587	0,413	1115,7	2,53	Lotto	1969	15032	[142]
0,587	0,413	1145,3	2,28	Lotto	1969	15032	[142]
0,587	0,413	1163,6	2,05	Lotto	1969	15032	[142]
0,587	0,413	1188,8	1,84	Lotto	1969	15032	[142]
0,589	0,411	1250,0	1,38	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,590	0,410	960,0	4,25	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,590	0,410	980,0	4,01	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,590	0,410	1000,0	3,76	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,590	0,410	1060,0	3,13	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,590	0,410	1100,0	2,70	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,590	0,410	1160,0	2,16	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,590	0,410	1200,0	1,81	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,590	0,410	1260,0	1,26	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,590	0,410	1300,0	0,94	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,590	0,410	1360,0	0,51	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,590	0,410	1400,0	0,29	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,590	0,410	1420,0	0,10	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,593	0,407	1000,0	3,59	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,593	0,407	1100,0	2,49	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,593	0,407	1200,0	1,61	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,598	0,402	950,0	4,47	Preston	1938	2713	[91]
0,598	0,402	1000,0	3,75	Preston	1938	2713	[91]
0,598	0,402	1050,0	3,15	Preston	1938	2713	[91]
0,598	0,402	1100,0	2,65	Preston	1938	2713	[91]
0,598	0,402	1150,0	2,14	Preston	1938	2713	[91]
0,598	0,402	1200,0	1,70	Preston	1938	2713	[91]
0,598	0,402	1250,0	1,34	Preston	1938	2713	[91]
0,598	0,402	1300,0	0,97	Preston	1938	2713	[91]
0,598	0,402	1350,0	0,60	Preston	1938	2713	[91]
0,598	0,402	1400,0	0,28	Preston	1938	2713	[91]
0,598	0,402	1450,0	0,00	Preston	1938	2713	[91]
0,600	0,400	950,0	4,61	Mazurin	1970	410	[94]
0,600	0,400	1000,0	3,75	Ota	1995	7208	[95]
0,600	0,400	1100,0	2,56	Ota	1995	7208	[95]
0,600	0,400	1125,0	2,30	Shvaiko	1968	3328	[96], [97], [98]
0,600	0,400	1150,0	1,73	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,600	0,400	1150,0	2,30	Mazurin	1970	410	[94]
0,600	0,400	1200,0	1,31	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,600	0,400	1200,0	1,57	Ota	1995	7208	[95]
0,600	0,400	1250,0	0,94	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,600	0,400	1300,0	0,60	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,600	0,400	1300,0	0,74	Ota	1995	7208	[95]
0,600	0,400	1350,0	0,28	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,600	0,400	1400,0	-0,02	Kawahara	1979	13784	[137]
0,600	0,400	1400,0	0,09	Kuroda	1982	6913	[141]
0,610	0,390	900,0	5,39	Lillie	1939	2714	[99]
0,610	0,390	1000,0	4,01	Lillie	1939	2714	[99]
0,610	0,390	1100,0	2,88	Lillie	1939	2714	[99]
0,610	0,390	1200,0	1,98	Lillie	1939	2714	[99]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,610	0,390	1300,0	1,17	Lillie	1939	2714	[99]
0,610	0,390	1400,0	0,46	Lillie	1939	2714	[99]
0,615	0,385	1250,0	1,50	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,615	0,385	1500,0	-0,30	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,619	0,381	1450,0	-0,05	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,619	0,381	1500,0	-0,36	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,619	0,381	1550,0	-0,64	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,626	0,374	900,0	5,55	Preston	1938	2712	[100]
0,626	0,374	1000,0	4,10	Preston	1938	2712	[100]
0,626	0,374	1100,0	3,06	Preston	1938	2712	[100]
0,626	0,374	1200,0	2,14	Preston	1938	2712	[100]
0,626	0,374	1300,0	1,34	Preston	1938	2712	[100]
0,626	0,374	1400,0	0,69	Preston	1938	2712	[100]
0,636	0,364	900,0	5,57	Preston	1938	2712	[100]
0,636	0,364	1000,0	4,14	Preston	1938	2712	[100]
0,636	0,364	1100,0	3,15	Preston	1938	2712	[100]
0,636	0,364	1200,0	2,23	Preston	1938	2712	[100]
0,636	0,364	1300,0	1,50	Preston	1938	2712	[100]
0,636	0,364	1400,0	0,97	Preston	1938	2712	[100]
0,637	0,363	900,0	5,76	Zak	1952	3037	[143]
0,638	0,362	900,0	5,80	Shartsis	1952	3144	[112]
0,638	0,362	900,0	5,94	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,638	0,362	1000,0	4,47	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,638	0,362	1005,0	4,33	Shartsis	1952	3144	[112]
0,638	0,362	1100,0	3,22	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,638	0,362	1102,0	3,18	Shartsis	1952	3144	[112]
0,638	0,362	1200,0	2,30	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,638	0,362	1200,0	2,39	Shartsis	1952	3144	[112]
0,638	0,362	1250,0	2,12	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,638	0,362	1298,0	1,68	Shartsis	1952	3144	[112]
0,638	0,362	1400,0	0,92	Shartsis	1952	3144	[112]
0,638	0,362	1500,0	0,53	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,640	0,360	900,0	5,92	Lillie	1939	2714	[99]
0,640	0,360	998,0	4,56	Appen	1964	20572	[144]
0,640	0,360	1000,0	4,47	Lillie	1939	2714	[99]
0,640	0,360	1062,0	3,87	Appen	1964	20572	[144]
0,640	0,360	1100,0	3,34	Lillie	1939	2714	[99]
0,640	0,360	1101,0	3,43	Appen	1964	20572	[144]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,640	0,360	1185,0	2,69	Appen	1964	20572	[144]
0,640	0,360	1200,0	2,42	Lillie	1939	2714	[99]
0,640	0,360	1300,0	1,61	Lillie	1939	2714	[99]
0,640	0,360	1309,0	1,73	Appen	1964	20572	[144]
0,640	0,360	1385,0	1,24	Appen	1964	20572	[144]
0,640	0,360	1400,0	0,92	Lillie	1939	2714	[99]
0,641	0,359	900,0	5,69	Preston	1938	2712	[100]
0,641	0,359	1000,0	4,19	Preston	1938	2712	[100]
0,641	0,359	1100,0	3,13	Preston	1938	2712	[100]
0,641	0,359	1200,0	2,19	Preston	1938	2712	[100]
0,641	0,359	1300,0	1,50	Preston	1938	2712	[100]
0,641	0,359	1400,0	0,97	Preston	1938	2712	[100]
0,644	0,356	900,0	5,99	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,644	0,356	960,0	5,05	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,644	0,356	980,0	4,78	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,644	0,356	1000,0	4,52	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,644	0,356	1060,0	3,84	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,644	0,356	1100,0	3,43	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,644	0,356	1160,0	2,94	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,644	0,356	1200,0	2,44	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,644	0,356	1260,0	2,03	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,644	0,356	1300,0	1,73	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,644	0,356	1360,0	1,30	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,644	0,356	1400,0	1,05	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,644	0,356	1420,0	0,92	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,650	0,350	900,0	5,83	Preston	1938	2712	[100]
0,650	0,350	1000,0	4,31	Preston	1938	2712	[100]
0,650	0,350	1000,0	4,61	Shvaiko	1968	3328	[96], [97], [98]
0,650	0,350	1100,0	3,18	Preston	1938	2712	[100]
0,650	0,350	1200,0	2,28	Preston	1938	2712	[100]
0,650	0,350	1230,0	2,30	Shvaiko	1968	3328	[96], [97], [98]
0,650	0,350	1250,0	2,42	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,650	0,350	1300,0	1,59	Preston	1938	2712	[100]
0,650	0,350	1352,0	1,61	Urbain	1985	12579	[145]
0,650	0,350	1400,0	1,04	Preston	1938	2712	[100]
0,650	0,350	1402,0	1,22	Urbain	1985	12579	[145]
0,650	0,350	1452,0	0,88	Urbain	1985	12579	[145]
0,650	0,350	1500,0	0,71	Winter-Klein	1965	16022	[138]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,650	0,350	1502,0	0,53	Urbain	1985	12579	[145]
0,650	0,350	1552,0	0,26	Urbain	1985	12579	[145]
0,652	0,348	900,0	5,87	Boow	1942	3183	[146]
0,652	0,348	986,0	4,61	Boow	1942	3183	[146]
0,652	0,348	1000,0	4,44	Boow	1942	3183	[146]
0,652	0,348	1098,0	3,45	Boow	1942	3183	[146]
0,652	0,348	1100,0	3,45	Boow	1942	3183	[146]
0,652	0,348	1200,0	2,53	Boow	1942	3183	[146]
0,652	0,348	1300,0	1,75	Boow	1942	3183	[146]
0,652	0,348	1400,0	1,04	Boow	1942	3183	[146]
0,655	0,345	900,0	5,96	Preston	1938	2713	[91]
0,655	0,345	900,0	6,04	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,655	0,345	950,0	5,20	Preston	1938	2713	[91]
0,655	0,345	960,0	5,18	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,655	0,345	980,0	4,92	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,655	0,345	1000,0	4,49	Preston	1938	2713	[91]
0,655	0,345	1000,0	4,67	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,655	0,345	1050,0	3,91	Preston	1938	2713	[91]
0,655	0,345	1060,0	3,96	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,655	0,345	1100,0	3,34	Preston	1938	2713	[91]
0,655	0,345	1100,0	3,54	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,655	0,345	1150,0	2,88	Preston	1938	2713	[91]
0,655	0,345	1160,0	2,99	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,655	0,345	1200,0	2,49	Preston	1938	2713	[91]
0,655	0,345	1200,0	2,62	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,655	0,345	1250,0	2,16	Preston	1938	2713	[91]
0,655	0,345	1260,0	2,13	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,655	0,345	1300,0	1,81	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,655	0,345	1300,0	1,87	Preston	1938	2713	[91]
0,655	0,345	1350,0	1,61	Preston	1938	2713	[91]
0,655	0,345	1360,0	1,34	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,655	0,345	1400,0	1,13	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,655	0,345	1400,0	1,22	Preston	1938	2713	[91]
0,655	0,345	1450,0	1,04	Preston	1938	2713	[91]
0,658	0,342	900,0	6,12	Lillie	1939	2714	[99]
0,658	0,342	1000,0	4,70	Lillie	1939	2714	[99]
0,658	0,342	1100,0	3,55	Lillie	1939	2714	[99]
0,658	0,342	1200,0	2,65	Lillie	1939	2714	[99]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,658	0,342	1300,0	1,84	Lillie	1939	2714	[99]
0,658	0,342	1400,0	1,15	Lillie	1939	2714	[99]
0,664	0,336	900,0	5,62	Preston	1938	2712	[100]
0,664	0,336	900,0	6,22	Lillie	1939	2714	[99]
0,664	0,336	900,0	6,36	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,664	0,336	1000,0	4,17	Preston	1938	2712	[100]
0,664	0,336	1000,0	4,79	Lillie	1939	2714	[99]
0,664	0,336	1000,0	4,86	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,664	0,336	1100,0	3,09	Preston	1938	2712	[100]
0,664	0,336	1100,0	3,59	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,664	0,336	1100,0	3,66	Lillie	1939	2714	[99]
0,664	0,336	1200,0	2,12	Preston	1938	2712	[100]
0,664	0,336	1200,0	2,60	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,664	0,336	1200,0	2,67	Lillie	1939	2714	[99]
0,664	0,336	1300,0	1,40	Preston	1938	2712	[100]
0,664	0,336	1300,0	1,89	Lillie	1939	2714	[99]
0,664	0,336	1400,0	0,74	Preston	1938	2712	[100]
0,664	0,336	1400,0	1,22	Lillie	1939	2714	[99]
0,665	0,335	885,0	6,55	Meiling	1967	3042	[147]
0,665	0,335	957,0	5,43	Meiling	1967	3042	[147]
0,665	0,335	1022,0	4,58	Meiling	1967	3042	[147]
0,665	0,335	1098,0	3,77	Meiling	1967	3042	[147]
0,665	0,335	1169,0	3,07	Meiling	1967	3042	[147]
0,665	0,335	1240,0	2,45	Meiling	1967	3042	[147]
0,665	0,335	1250,0	2,53	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,665	0,335	1305,0	1,94	Meiling	1967	3042	[147]
0,665	0,335	1500,0	0,85	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,666	0,334	1250,0	2,21	Grussaute	2000	17369	[148]
0,666	0,334	1350,0	1,47	Grussaute	2000	17369	[148]
0,667	0,333	900,0	5,94	Ota	1988	10314	[149], [150]
0,667	0,333	900,0	6,20	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,667	0,333	900,0	6,45	Komleva	1971	7548	[151]
0,667	0,333	950,0	5,25	Ota	1988	10314	[149], [150]
0,667	0,333	960,0	5,28	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,667	0,333	980,0	5,03	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,667	0,333	995,0	4,84	Ota	1991	4109	[152]
0,667	0,333	1000,0	4,72	Ota	1988	10314	[149], [150]
0,667	0,333	1000,0	4,74	Ota	1995	7208	[95]

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O [wt%]	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,667	0,333	1000,0	4,74	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,667	0,333	1000,0	4,78	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,667	0,333	1000,0	5,07	Komleva	1971	7548	[151]
0,667	0,333	1045,0	4,37	Ota	1991	4109	[152]
0,667	0,333	1060,0	4,08	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,667	0,333	1095,0	3,91	Ota	1991	4109	[152]
0,667	0,333	1100,0	3,65	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,667	0,333	1100,0	3,68	Ota	1995	7208	[95]
0,667	0,333	1100,0	3,71	Ota	1988	10314	[149], [150]
0,667	0,333	1150,0	3,45	Ota	1991	4109	[152]
0,667	0,333	1160,0	3,09	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,667	0,333	1195,0	2,76	Ota	1991	4109	[152]
0,667	0,333	1200,0	2,72	Scarfe	1979	11536	[140]
0,667	0,333	1200,0	2,75	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,667	0,333	1200,0	2,76	Ota	1995	7208	[95]
0,667	0,333	1200,0	2,76	Ota	1988	10314	[149], [150]
0,667	0,333	1245,0	2,53	Ota	1991	4109	[152]
0,667	0,333	1260,0	2,25	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,667	0,333	1295,0	2,07	Ota	1991	4109	[152]
0,667	0,333	1300,0	1,96	Ota	1995	7208	[95]
0,667	0,333	1300,0	1,97	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,667	0,333	1300,0	1,98	Ota	1988	10314	[149], [150]
0,667	0,333	1300,0	2,00	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,667	0,333	1360,0	1,57	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,667	0,333	1400,0	1,28	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,669	0,331	900,0	5,64	Preston	1938	2712	[100]
0,669	0,331	900,0	5,80	Hunold	1980	9332	[153]
0,669	0,331	900,0	6,24	Lillie	1939	2714	[99]
0,669	0,331	1000,0	4,19	Preston	1938	2712	[100]
0,669	0,331	1000,0	4,79	Lillie	1939	2714	[99]
0,669	0,331	1100,0	3,11	Preston	1938	2712	[100]
0,669	0,331	1100,0	3,38	Hunold	1980	9332	[153]
0,669	0,331	1100,0	3,64	Lillie	1939	2714	[99]
0,669	0,331	1200,0	2,12	Preston	1938	2712	[100]
0,669	0,331	1200,0	2,72	Lillie	1939	2714	[99]
0,669	0,331	1300,0	1,31	Preston	1938	2712	[100]
0,669	0,331	1300,0	1,91	Lillie	1939	2714	[99]
0,669	0,331	1300,0	2,00	Hunold	1980	9332	[153]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,669	0,331	1400,0	0,62	Preston	1938	2712	[100]
0,669	0,331	1400,0	1,20	Lillie	1939	2714	[99]
0,669	0,331	1500,0	1,15	Hunold	1980	9332	[153]
0,671	0,329	899,0	6,12	Shartsis	1952	3144	[112]
0,671	0,329	1003,0	4,79	Shartsis	1952	3144	[112]
0,671	0,329	1105,0	3,62	Shartsis	1952	3144	[112]
0,671	0,329	1205,0	2,72	Shartsis	1952	3144	[112]
0,671	0,329	1303,0	1,80	Shartsis	1952	3144	[112]
0,671	0,329	1404,0	1,08	Shartsis	1952	3144	[112]
0,675	0,325	900,0	5,89	Preston	1938	2712	[100]
0,675	0,325	900,0	6,31	Lillie	1939	2714	[99]
0,675	0,325	1000,0	4,35	Preston	1938	2712	[100]
0,675	0,325	1000,0	4,88	Lillie	1939	2714	[99]
0,675	0,325	1100,0	3,20	Preston	1938	2712	[100]
0,675	0,325	1100,0	3,73	Lillie	1939	2714	[99]
0,675	0,325	1200,0	2,23	Preston	1938	2712	[100]
0,675	0,325	1200,0	2,79	Lillie	1939	2714	[99]
0,675	0,325	1300,0	1,43	Preston	1938	2712	[100]
0,675	0,325	1300,0	2,00	Lillie	1939	2714	[99]
0,675	0,325	1400,0	0,78	Preston	1938	2712	[100]
0,675	0,325	1400,0	1,27	Lillie	1939	2714	[99]
0,678	0,322	900,0	6,36	Lillie	1939	2714	[99]
0,678	0,322	1000,0	4,95	Lillie	1939	2714	[99]
0,678	0,322	1100,0	3,78	Lillie	1939	2714	[99]
0,678	0,322	1200,0	2,83	Lillie	1939	2714	[99]
0,678	0,322	1300,0	2,03	Lillie	1939	2714	[99]
0,678	0,322	1400,0	1,31	Lillie	1939	2714	[99]
0,681	0,319	900,0	6,10	Preston	1938	2712	[100]
0,681	0,319	1000,0	4,42	Preston	1938	2712	[100]
0,681	0,319	1100,0	3,32	Preston	1938	2712	[100]
0,681	0,319	1200,0	2,44	Preston	1938	2712	[100]
0,681	0,319	1250,0	2,86	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,681	0,319	1300,0	1,73	Preston	1938	2712	[100]
0,681	0,319	1400,0	1,20	Preston	1938	2712	[100]
0,682	0,318	900,0	6,31	Preston	1938	2712	[100]
0,682	0,318	1000,0	4,65	Preston	1938	2712	[100]
0,682	0,318	1100,0	3,55	Preston	1938	2712	[100]
0,682	0,318	1200,0	2,60	Preston	1938	2712	[100]

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,682	0,318	1300,0	1,82	Preston	1938	2712	[100]
0,682	0,318	1400,0	1,38	Preston	1938	2712	[100]
0,685	0,315	900,0	6,72	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,685	0,315	960,0	5,77	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,685	0,315	980,0	5,50	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,685	0,315	1000,0	5,24	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,685	0,315	1060,0	4,36	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,685	0,315	1100,0	3,99	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,685	0,315	1160,0	3,23	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,685	0,315	1200,0	2,97	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,685	0,315	1260,0	2,58	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,685	0,315	1300,0	2,50	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,685	0,315	1360,0	1,81	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,689	0,311	900,0	6,54	Lillie	1939	2714	[99]
0,689	0,311	1000,0	5,09	Lillie	1939	2714	[99]
0,689	0,311	1100,0	3,91	Lillie	1939	2714	[99]
0,689	0,311	1200,0	2,95	Lillie	1939	2714	[99]
0,689	0,311	1300,0	2,14	Lillie	1939	2714	[99]
0,689	0,311	1400,0	1,43	Lillie	1939	2714	[99]
0,690	0,310	900,0	6,77	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,690	0,310	1000,0	5,25	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,690	0,310	1100,0	3,87	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,690	0,310	1200,0	2,90	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,692	0,308	1001,0	5,25	Lotto	1966	15031	[154]
0,692	0,308	1009,0	5,16	Lotto	1966	15031	[154]
0,692	0,308	1058,0	4,51	Lotto	1966	15031	[154]
0,692	0,308	1114,0	3,89	Lotto	1966	15031	[154]
0,692	0,308	1163,0	3,41	Lotto	1966	15031	[154]
0,692	0,308	1221,0	2,90	Lotto	1966	15031	[154]
0,692	0,308	1288,0	2,35	Lotto	1966	15031	[154]
0,692	0,308	1358,0	1,80	Lotto	1966	15031	[154]
0,692	0,308	1424,0	1,36	Lotto	1966	15031	[154]
0,694	0,306	900,0	6,19	Dingwell	1998	20565	[155]
0,694	0,306	900,0	6,49	Preston	1938	2712	[100]
0,694	0,306	950,0	5,46	Dingwell	1998	20565	[155]
0,694	0,306	1000,0	4,81	Dingwell	1998	20565	[155]
0,694	0,306	1000,0	4,97	Preston	1938	2712	[100]
0,694	0,306	1100,0	3,71	Preston	1938	2712	[100]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,694	0,306	1200,0	2,76	Preston	1938	2712	[100]
0,694	0,306	1300,0	2,19	Preston	1938	2712	[100]
0,694	0,306	1400,0	1,66	Preston	1938	2712	[100]
0,699	0,301	894,0	6,70	Shartsis	1952	3144	[112]
0,699	0,301	995,0	5,18	Shartsis	1952	3144	[112]
0,699	0,301	1097,0	3,96	Shartsis	1952	3144	[112]
0,699	0,301	1195,0	2,88	Shartsis	1952	3144	[112]
0,699	0,301	1300,0	2,10	Shartsis	1952	3144	[112]
0,699	0,301	1403,0	1,59	Shartsis	1952	3144	[112]
0,700	0,300	900,0	6,91	Mazurin	1970	410	[94]
0,700	0,300	900,0	6,91	Shvaiko	1968	3328	[96], [97], [98]
0,700	0,300	900,0	6,91	Ivanov	1969	3329	[156], [157]
0,700	0,300	1056,0	4,61	Shvaiko	1968	3328	[96], [97], [98]
0,700	0,300	1066,0	4,61	Mazurin	1970	410	[94]
0,700	0,300	1066,0	4,61	Ivanov	1969	3329	[156], [157]
0,700	0,300	1250,0	2,51	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,700	0,300	1250,0	2,83	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,700	0,300	1290,0	2,30	Shvaiko	1968	3328	[96], [97], [98]
0,700	0,300	1300,0	2,12	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,700	0,300	1310,0	2,30	Mazurin	1970	410	[94]
0,700	0,300	1310,0	2,30	Ivanov	1969	3329	[156], [157]
0,700	0,300	1350,0	1,75	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,700	0,300	1400,0	1,38	Kuroda	1982	6913	[141]
0,700	0,300	1400,0	1,43	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,700	0,300	1400,0	1,50	Kawahara	1979	13784	[137]
0,700	0,300	1450,0	1,11	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,700	0,300	1500,0	1,15	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,701	0,299	850,0	7,60	Preston	1938	2713	[91]
0,701	0,299	900,0	6,65	Preston	1938	2713	[91]
0,701	0,299	950,0	5,85	Preston	1938	2713	[91]
0,701	0,299	1000,0	5,16	Preston	1938	2713	[91]
0,701	0,299	1050,0	4,54	Preston	1938	2713	[91]
0,701	0,299	1100,0	3,96	Preston	1938	2713	[91]
0,701	0,299	1150,0	3,45	Preston	1938	2713	[91]
0,701	0,299	1200,0	3,02	Preston	1938	2713	[91]
0,701	0,299	1250,0	2,69	Preston	1938	2713	[91]
0,701	0,299	1300,0	2,42	Preston	1938	2713	[91]
0,701	0,299	1350,0	2,16	Preston	1938	2713	[91]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O [wt%]	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,701	0,299	1400,0	1,96	Preston	1938	2713	[91]
0,701	0,299	1450,0	1,80	Preston	1938	2713	[91]
0,705	0,295	860,0	7,65	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,705	0,295	900,0	6,90	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,705	0,295	960,0	5,95	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,705	0,295	980,0	5,63	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,705	0,295	1000,0	5,39	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,705	0,295	1060,0	4,56	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,705	0,295	1100,0	4,16	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,705	0,295	1160,0	3,57	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,705	0,295	1200,0	3,22	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,705	0,295	1260,0	2,72	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,705	0,295	1300,0	2,48	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,705	0,295	1360,0	1,99	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,705	0,295	1400,0	1,70	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,708	0,292	1450,0	1,31	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,708	0,292	1500,0	0,99	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,708	0,292	1550,0	0,69	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,709	0,291	900,0	6,86	Lillie	1939	2714	[99]
0,709	0,291	1000,0	5,34	Lillie	1939	2714	[99]
0,709	0,291	1100,0	4,17	Lillie	1939	2714	[99]
0,709	0,291	1200,0	3,20	Lillie	1939	2714	[99]
0,709	0,291	1300,0	2,37	Lillie	1939	2714	[99]
0,709	0,291	1400,0	1,66	Lillie	1939	2714	[99]
0,710	0,290	892,0	6,91	Boow	1942	3183	[146]
0,710	0,290	900,0	6,77	Boow	1942	3183	[146]
0,710	0,290	1000,0	5,37	Boow	1942	3183	[146]
0,710	0,290	1067,0	4,61	Boow	1942	3183	[146]
0,710	0,290	1100,0	4,28	Boow	1942	3183	[146]
0,710	0,290	1187,0	3,45	Boow	1942	3183	[146]
0,710	0,290	1200,0	3,34	Boow	1942	3183	[146]
0,710	0,290	1300,0	2,49	Boow	1942	3183	[146]
0,710	0,290	1400,0	1,77	Boow	1942	3183	[146]
0,715	0,285	1500,0	1,50	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,716	0,284	900,0	6,82	Preston	1938	2712	[100]
0,716	0,284	1000,0	5,25	Preston	1938	2712	[100]
0,716	0,284	1100,0	4,10	Preston	1938	2712	[100]
0,716	0,284	1200,0	3,13	Preston	1938	2712	[100]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,716	0,284	1300,0	2,51	Preston	1938	2712	[100]
0,716	0,284	1400,0	2,03	Preston	1938	2712	[100]
0,722	0,278	900,0	7,07	Lillie	1939	2714	[99]
0,722	0,278	1000,0	5,55	Lillie	1939	2714	[99]
0,722	0,278	1100,0	4,37	Lillie	1939	2714	[99]
0,722	0,278	1200,0	3,41	Lillie	1939	2714	[99]
0,722	0,278	1300,0	2,58	Lillie	1939	2714	[99]
0,722	0,278	1400,0	1,82	Lillie	1939	2714	[99]
0,728	0,272	900,0	7,02	Preston	1938	2712	[100]
0,728	0,272	1000,0	5,46	Preston	1938	2712	[100]
0,728	0,272	1100,0	4,24	Preston	1938	2712	[100]
0,728	0,272	1200,0	3,32	Preston	1938	2712	[100]
0,728	0,272	1300,0	2,56	Preston	1938	2712	[100]
0,728	0,272	1400,0	1,96	Preston	1938	2712	[100]
0,730	0,270	1500,0	1,68	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,735	0,265	860,0	7,78	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,735	0,265	900,0	7,06	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,735	0,265	960,0	6,11	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,735	0,265	980,0	5,83	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,735	0,265	1000,0	5,50	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,735	0,265	1060,0	4,80	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,735	0,265	1100,0	4,38	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,735	0,265	1160,0	3,78	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,735	0,265	1200,0	3,40	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,735	0,265	1250,0	3,34	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,735	0,265	1260,0	2,94	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,735	0,265	1300,0	2,60	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,735	0,265	1360,0	2,20	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,735	0,265	1400,0	1,91	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,735	0,265	1420,0	1,79	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,735	0,265	1500,0	1,70	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,738	0,262	900,0	7,32	Lillie	1939	2714	[99]
0,738	0,262	1000,0	5,73	Lillie	1939	2714	[99]
0,738	0,262	1100,0	4,54	Lillie	1939	2714	[99]
0,738	0,262	1200,0	3,55	Lillie	1939	2714	[99]
0,738	0,262	1300,0	2,72	Lillie	1939	2714	[99]
0,738	0,262	1400,0	2,00	Lillie	1939	2714	[99]
0,739	0,261	900,0	7,31	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O [wt%]	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,739	0,261	960,0	6,37	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,739	0,261	980,0	6,09	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,739	0,261	1000,0	5,83	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,739	0,261	1060,0	5,01	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,739	0,261	1100,0	4,61	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,739	0,261	1160,0	4,01	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,739	0,261	1200,0	3,64	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,739	0,261	1260,0	3,18	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,739	0,261	1300,0	2,86	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,739	0,261	1360,0	2,38	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,739	0,261	1400,0	2,09	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,739	0,261	1420,0	1,97	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,740	0,260	900,0	7,35	Lillie	1939	2714	[99]
0,740	0,260	1000,0	5,80	Lillie	1939	2714	[99]
0,740	0,260	1100,0	4,56	Lillie	1939	2714	[99]
0,740	0,260	1200,0	3,57	Lillie	1939	2714	[99]
0,740	0,260	1300,0	2,74	Lillie	1939	2714	[99]
0,740	0,260	1400,0	2,03	Lillie	1939	2714	[99]
0,744	0,256	900,0	6,95	Preston	1938	2712	[100]
0,744	0,256	1000,0	5,43	Preston	1938	2712	[100]
0,744	0,256	1100,0	4,26	Preston	1938	2712	[100]
0,744	0,256	1200,0	3,27	Preston	1938	2712	[100]
0,744	0,256	1300,0	2,58	Preston	1938	2712	[100]
0,744	0,256	1400,0	1,96	Preston	1938	2712	[100]
0,745	0,255	920,0	6,91	Zak	1952	3037	[143]
0,745	0,255	1000,0	5,76	Zak	1952	3037	[143]
0,748	0,252	900,0	7,41	Lillie	1939	2714	[99]
0,748	0,252	1000,0	5,87	Lillie	1939	2714	[99]
0,748	0,252	1100,0	4,65	Lillie	1939	2714	[99]
0,748	0,252	1200,0	3,64	Lillie	1939	2714	[99]
0,748	0,252	1300,0	2,81	Lillie	1939	2714	[99]
0,748	0,252	1400,0	2,10	Lillie	1939	2714	[99]
0,749	0,251	900,0	7,69	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,749	0,251	1000,0	6,08	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,749	0,251	1100,0	4,79	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,749	0,251	1200,0	3,64	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,749	0,251	1300,0	2,67	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,750	0,250	850,0	8,50	Preston	1938	2713	[91]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,750	0,250	900,0	7,48	Preston	1938	2713	[91]
0,750	0,250	944,0	6,91	Shvaiko	1968	3328	[96], [97], [98]
0,750	0,250	950,0	6,59	Preston	1938	2713	[91]
0,750	0,250	1000,0	5,85	Preston	1938	2713	[91]
0,750	0,250	1000,0	5,92	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,750	0,250	1050,0	5,16	Preston	1938	2713	[91]
0,750	0,250	1095,0	4,90	Ji-Jian	1986	30132	[160]
0,750	0,250	1100,0	4,58	Preston	1938	2713	[91]
0,750	0,250	1110,0	4,61	Shvaiko	1968	3328	[96], [97], [98]
0,750	0,250	1150,0	4,08	Preston	1938	2713	[91]
0,750	0,250	1152,0	4,42	Ji-Jian	1986	30132	[160]
0,750	0,250	1197,0	3,91	Ji-Jian	1986	30132	[160]
0,750	0,250	1200,0	3,64	Preston	1938	2713	[91]
0,750	0,250	1200,0	3,73	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,750	0,250	1246,0	3,45	Ji-Jian	1986	30132	[160]
0,750	0,250	1250,0	3,27	Preston	1938	2713	[91]
0,750	0,250	1250,0	3,62	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,750	0,250	1300,0	2,97	Preston	1938	2713	[91]
0,750	0,250	1300,0	3,06	Ji-Jian	1986	30132	[160]
0,750	0,250	1350,0	2,65	Preston	1938	2713	[91]
0,750	0,250	1351,0	2,62	Ji-Jian	1986	30132	[160]
0,750	0,250	1370,0	2,30	Shvaiko	1968	3328	[96], [97], [98]
0,750	0,250	1400,0	2,14	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,750	0,250	1400,0	2,37	Preston	1938	2713	[91]
0,750	0,250	1450,0	2,14	Preston	1938	2713	[91]
0,750	0,250	1500,0	1,77	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,754	0,246	1066,0	5,00	Lotto	1966	15031	[154]
0,754	0,246	1129,0	4,28	Lotto	1966	15031	[154]
0,754	0,246	1198,0	3,57	Lotto	1966	15031	[154]
0,754	0,246	1248,0	3,15	Lotto	1966	15031	[154]
0,754	0,246	1298,0	2,76	Lotto	1966	15031	[154]
0,754	0,246	1364,0	2,30	Lotto	1966	15031	[154]
0,757	0,243	900,0	7,58	Lillie	1939	2714	[99]
0,757	0,243	1000,0	6,03	Lillie	1939	2714	[99]
0,757	0,243	1100,0	4,79	Lillie	1939	2714	[99]
0,757	0,243	1200,0	3,75	Lillie	1939	2714	[99]
0,757	0,243	1300,0	2,90	Lillie	1939	2714	[99]
0,757	0,243	1400,0	2,19	Lillie	1939	2714	[99]

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,760	0,240	1252,0	3,75	Urbain	1985	12579	[145]
0,760	0,240	1302,0	3,30	Urbain	1985	12579	[145]
0,760	0,240	1352,0	2,86	Urbain	1985	12579	[145]
0,760	0,240	1402,0	2,45	Urbain	1985	12579	[145]
0,760	0,240	1452,0	2,08	Urbain	1985	12579	[145]
0,765	0,235	960,0	7,07	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,765	0,235	980,0	6,75	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,765	0,235	1000,0	6,46	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,765	0,235	1060,0	5,62	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,765	0,235	1100,0	5,12	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,765	0,235	1160,0	4,49	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,765	0,235	1200,0	4,00	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,765	0,235	1260,0	3,55	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,765	0,235	1300,0	3,23	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,765	0,235	1360,0	2,79	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,765	0,235	1400,0	2,50	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,765	0,235	1420,0	2,35	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,772	0,228	954,0	6,59	Dingwell	1990	29210	[161]
0,772	0,228	1003,0	5,87	Dingwell	1990	29210	[161]
0,772	0,228	1052,0	5,25	Dingwell	1990	29210	[161]
0,772	0,228	1102,0	4,67	Dingwell	1990	29210	[161]
0,772	0,228	1151,0	4,14	Dingwell	1990	29210	[161]
0,772	0,228	1200,0	3,66	Dingwell	1990	29210	[161]
0,779	0,221	1100,0	5,02	Preston	1938	2712	[100]
0,779	0,221	1200,0	4,01	Preston	1938	2712	[100]
0,779	0,221	1300,0	3,18	Preston	1938	2712	[100]
0,779	0,221	1400,0	2,60	Preston	1938	2712	[100]
0,780	0,220	1000,0	6,54	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,780	0,220	1060,0	5,65	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,780	0,220	1100,0	5,19	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,780	0,220	1160,0	4,50	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,780	0,220	1200,0	4,13	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,780	0,220	1260,0	3,59	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,780	0,220	1300,0	3,30	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,780	0,220	1360,0	2,91	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,780	0,220	1400,0	2,62	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,780	0,220	1420,0	2,47	Skornyakov	1941	2717	[102], [103]
0,786	0,214	1000,0	6,52	Lillie	1939	2714	[99]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,786	0,214	1100,0	5,25	Lillie	1939	2714	[99]
0,786	0,214	1200,0	4,19	Lillie	1939	2714	[99]
0,786	0,214	1300,0	3,32	Lillie	1939	2714	[99]
0,786	0,214	1400,0	2,56	Lillie	1939	2714	[99]
0,788	0,212	1100,0	5,16	Preston	1938	2712	[100]
0,788	0,212	1200,0	4,17	Preston	1938	2712	[100]
0,788	0,212	1300,0	3,32	Preston	1938	2712	[100]
0,788	0,212	1400,0	2,65	Preston	1938	2712	[100]
0,792	0,208	1250,0	4,01	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,792	0,208	1500,0	2,07	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,796	0,204	1050,0	5,99	Preston	1938	2713	[91]
0,796	0,204	1100,0	5,32	Preston	1938	2713	[91]
0,796	0,204	1150,0	4,74	Preston	1938	2713	[91]
0,796	0,204	1200,0	4,28	Preston	1938	2713	[91]
0,796	0,204	1250,0	3,87	Preston	1938	2713	[91]
0,796	0,204	1300,0	3,45	Preston	1938	2713	[91]
0,796	0,204	1350,0	3,13	Preston	1938	2713	[91]
0,796	0,204	1400,0	2,79	Preston	1938	2713	[91]
0,796	0,204	1450,0	2,53	Preston	1938	2713	[91]
0,800	0,200	1158,0	4,61	Ivanov	1969	3329	[156], [157]
0,800	0,200	1170,0	4,61	Shvaiko	1968	3328	[96], [97], [98]
0,800	0,200	1250,0	4,35	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,800	0,200	1300,0	3,38	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,800	0,200	1350,0	2,95	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,800	0,200	1400,0	2,60	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,800	0,200	1400,0	2,65	Kawahara	1979	13784	[137]
0,800	0,200	1440,0	2,30	Shvaiko	1968	3328	[96], [97], [98]
0,800	0,200	1450,0	2,26	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,800	0,200	1450,0	2,30	Ivanov	1969	3329	[156], [157]
0,800	0,200	1450,0	2,35	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,800	0,200	1500,0	1,93	Kawahara	1977	4207	[92], [93]
0,800	0,200	1500,0	2,26	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,802	0,198	1100,0	5,41	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,802	0,198	1200,0	4,26	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,802	0,198	1300,0	3,36	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,802	0,198	1400,0	2,58	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,805	0,195	1101,0	5,53	Shartsis	1952	3144	[112]
0,805	0,195	1202,0	4,54	Shartsis	1952	3144	[112]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,805	0,195	1204,0	4,44	Shartsis	1952	3144	[112]
0,805	0,195	1290,0	3,66	Shartsis	1952	3144	[112]
0,805	0,195	1295,0	3,55	Shartsis	1952	3144	[112]
0,805	0,195	1392,0	2,97	Shartsis	1952	3144	[112]
0,805	0,195	1408,0	2,76	Shartsis	1952	3144	[112]
0,806	0,194	1450,0	2,53	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,806	0,194	1500,0	2,19	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,806	0,194	1550,0	1,87	Mizoguchi	1986	4587	[139]
0,817	0,183	1200,0	4,67	Preston	1938	2712	[100]
0,817	0,183	1300,0	3,87	Preston	1938	2712	[100]
0,817	0,183	1400,0	3,13	Preston	1938	2712	[100]
0,823	0,177	1250,0	5,16	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,823	0,177	1500,0	2,72	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,824	0,176	1200,0	4,88	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,824	0,176	1300,0	3,78	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,824	0,176	1400,0	2,97	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,824	0,176	1500,0	2,21	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,828	0,172	1200,0	5,02	Preston	1938	2712	[100]
0,828	0,172	1300,0	4,21	Preston	1938	2712	[100]
0,828	0,172	1400,0	3,34	Preston	1938	2712	[100]
0,836	0,164	1300,0	4,33	Preston	1938	2712	[100]
0,836	0,164	1400,0	3,50	Preston	1938	2712	[100]
0,840	0,160	1258,0	4,76	Urbain	1985	12579	[145]
0,840	0,160	1261,0	4,59	Urbain	1985	12579	[145]
0,840	0,160	1383,0	3,59	Urbain	1985	12579	[145]
0,840	0,160	1386,0	3,48	Urbain	1985	12579	[145]
0,840	0,160	1430,0	3,10	Urbain	1985	12579	[145]
0,840	0,160	1451,0	2,96	Urbain	1985	12579	[145]
0,840	0,160	1466,0	2,85	Urbain	1985	12579	[145]
0,840	0,160	1532,0	2,40	Urbain	1985	12579	[145]
0,840	0,160	1555,0	2,25	Urbain	1985	12579	[145]
0,840	0,160	1590,0	2,07	Urbain	1985	12579	[145]
0,850	0,150	1400,0	3,71	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,850	0,150	1450,0	3,18	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,850	0,150	1500,0	2,88	Shvaiko	1971	2725	[101]
0,850	0,150	1500,0	3,20	Winter-Klein	1965	16022	[138]
0,850	0,150	1540,0	2,30	Shvaiko	1968	3328	[96], [97], [98]
0,852	0,148	1350,0	4,24	Preston	1938	2713	[91]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,852	0,148	1400,0	3,73	Preston	1938	2713	[91]
0,852	0,148	1450,0	3,34	Preston	1938	2713	[91]
0,852	0,148	1500,0	3,04	Preston	1938	2713	[91]
0,880	0,120	1500,0	3,87	Winter-Klein	1965	16022	[138]

System SiO₂-K₂O

SiO ₂ [wt%]	K ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,500	0,500	984,0	0,14	Asayama	1993	2129	[162]
0,500	0,500	1003,0	-0,21	Asayama	1993	2129	[162]
0,500	0,500	1028,0	-0,74	Asayama	1993	2129	[162]
0,550	0,450	1042,0	1,75	Asayama	1993	2129	[162]
0,550	0,450	1050,0	1,59	Asayama	1993	2129	[162]
0,550	0,450	1074,0	1,31	Asayama	1993	2129	[162]
0,550	0,450	1102,0	1,04	Asayama	1993	2129	[162]
0,550	0,450	1126,0	0,81	Asayama	1993	2129	[162]
0,550	0,450	1152,0	0,51	Asayama	1993	2129	[162]
0,550	0,450	1178,0	0,21	Asayama	1993	2129	[162]
0,550	0,450	1250,0	0,53	Mizoguchi	1982	1955	[105]
0,550	0,450	1300,0	0,19	Mizoguchi	1982	1955	[105]
0,550	0,450	1350,0	-0,14	Mizoguchi	1982	1955	[105]
0,550	0,450	1400,0	-0,44	Mizoguchi	1982	1955	[105]
0,600	0,400	1000,0	5,13	Ota	1995	7208	[95]
0,600	0,400	1100,0	3,55	Ota	1995	7208	[95]
0,600	0,400	1154,0	2,53	Asayama	1993	2129	[162]
0,600	0,400	1178,0	2,23	Asayama	1993	2129	[162]
0,600	0,400	1200,0	2,23	Ota	1995	7208	[95]
0,600	0,400	1202,0	1,98	Asayama	1993	2129	[162]
0,600	0,400	1229,0	1,70	Asayama	1993	2129	[162]
0,600	0,400	1250,0	1,52	Asayama	1993	2129	[162]
0,600	0,400	1250,0	1,54	Mizoguchi	1982	1955	[105]
0,600	0,400	1279,0	1,31	Asayama	1993	2129	[162]
0,600	0,400	1300,0	1,13	Ota	1995	7208	[95]
0,600	0,400	1300,0	1,16	Mizoguchi	1982	1955	[105]
0,600	0,400	1304,0	1,11	Asayama	1993	2129	[162]
0,600	0,400	1330,0	0,94	Asayama	1993	2129	[162]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	K ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,600	0,400	1350,0	0,81	Mizoguchi	1982	1955	[105]
0,600	0,400	1355,0	0,76	Asayama	1993	2129	[162]
0,600	0,400	1376,0	0,55	Asayama	1993	2129	[162]
0,600	0,400	1400,0	0,48	Mizoguchi	1982	1955	[105]
0,600	0,400	1405,0	0,32	Asayama	1993	2129	[162]
0,600	0,400	1423,0	0,07	Asayama	1993	2129	[162]
0,600	0,400	1451,0	-0,16	Asayama	1993	2129	[162]
0,640	0,360	1027,0	5,57	Appen	1964	20572	[144]
0,640	0,360	1153,0	4,01	Appen	1964	20572	[144]
0,640	0,360	1254,0	2,86	Appen	1964	20572	[144]
0,640	0,360	1375,0	1,59	Appen	1964	20572	[144]
0,650	0,350	1250,0	2,65	Mizoguchi	1982	1955	[105]
0,650	0,350	1279,0	2,26	Asayama	1993	2129	[162]
0,650	0,350	1300,0	2,31	Mizoguchi	1982	1955	[105]
0,650	0,350	1304,0	2,19	Asayama	1993	2129	[162]
0,650	0,350	1328,0	2,00	Asayama	1993	2129	[162]
0,650	0,350	1350,0	1,99	Mizoguchi	1982	1955	[105]
0,650	0,350	1357,0	1,82	Asayama	1993	2129	[162]
0,650	0,350	1379,0	1,59	Asayama	1993	2129	[162]
0,650	0,350	1400,0	1,68	Mizoguchi	1982	1955	[105]
0,650	0,350	1403,0	1,38	Asayama	1993	2129	[162]
0,650	0,350	1421,0	1,20	Asayama	1993	2129	[162]
0,650	0,350	1451,0	1,04	Asayama	1993	2129	[162]
0,650	0,350	1475,0	0,85	Asayama	1993	2129	[162]
0,650	0,350	1500,0	0,64	Asayama	1993	2129	[162]
0,667	0,333	1100,0	4,42	Ota	1995	7208	[95]
0,667	0,333	1100,0	4,84	Ota	1991	4109	[152]
0,667	0,333	1150,0	4,14	Ota	1991	4109	[152]
0,667	0,333	1200,0	3,25	Ota	1995	7208	[95]
0,667	0,333	1200,0	3,68	Ota	1991	4109	[152]
0,667	0,333	1245,0	3,22	Ota	1991	4109	[152]
0,667	0,333	1295,0	2,76	Ota	1991	4109	[152]
0,667	0,333	1300,0	2,21	Ota	1995	7208	[95]
0,667	0,333	1300,0	2,79	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,670	0,330	1103,0	4,67	Shartsis	1952	3144	[112]
0,670	0,330	1208,0	3,50	Shartsis	1952	3144	[112]
0,670	0,330	1305,0	2,49	Shartsis	1952	3144	[112]
0,670	0,330	1406,0	1,54	Shartsis	1952	3144	[112]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	K ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,688	0,312	1098,0	5,04	Shartsis	1952	3144	[112]
0,688	0,312	1204,0	3,75	Shartsis	1952	3144	[112]
0,688	0,312	1288,0	4,35	Shartsis	1952	3144	[112]
0,688	0,312	1388,0	1,93	Shartsis	1952	3144	[112]
0,700	0,300	1100,0	5,30	Saringyulyan	1970	3561	[107], [108] , [109], [110], [111]
0,700	0,300	1200,0	4,14	Saringyulyan	1970	3561	[107], [108] , [109], [110], [111]
0,700	0,300	1300,0	2,92	Mizoguchi	1982	1955	[105]
0,700	0,300	1300,0	3,27	Saringyulyan	1970	3561	[107], [108] , [109], [110], [111]
0,700	0,300	1350,0	2,58	Mizoguchi	1982	1955	[105]
0,700	0,300	1355,0	2,42	Asayama	1993	2129	[162]
0,700	0,300	1376,0	2,21	Asayama	1993	2129	[162]
0,700	0,300	1400,0	2,26	Mizoguchi	1982	1955	[105]
0,700	0,300	1400,0	2,42	Saringyulyan	1970	3561	[107], [108] , [109], [110], [111]
0,700	0,300	1403,0	2,00	Asayama	1993	2129	[162]
0,700	0,300	1423,0	1,80	Asayama	1993	2129	[162]
0,700	0,300	1454,0	1,63	Asayama	1993	2129	[162]
0,700	0,300	1475,0	1,47	Asayama	1993	2129	[162]
0,700	0,300	1500,0	1,29	Asayama	1993	2129	[162]
0,713	0,287	1003,0	6,65	Shartsis	1952	3144	[112]
0,713	0,287	1102,0	5,27	Shartsis	1952	3144	[112]
0,713	0,287	1200,0	4,10	Shartsis	1952	3144	[112]
0,713	0,287	1298,0	3,18	Shartsis	1952	3144	[112]
0,713	0,287	1400,0	2,10	Shartsis	1952	3144	[112]
0,731	0,269	1005,0	6,91	Shartsis	1952	3144	[112]
0,731	0,269	1102,0	5,53	Shartsis	1952	3144	[112]
0,731	0,269	1204,0	4,35	Shartsis	1952	3144	[112]
0,731	0,269	1300,0	3,32	Shartsis	1952	3144	[112]
0,731	0,269	1399,0	2,44	Shartsis	1952	3144	[112]
0,750	0,250	1000,0	6,91	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,750	0,250	1147,0	5,18	Ji-Jian	1986	30132	[160]
0,750	0,250	1192,0	4,61	Ji-Jian	1986	30132	[160]
0,750	0,250	1200,0	4,37	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,750	0,250	1245,0	4,10	Ji-Jian	1986	30132	[160]
0,750	0,250	1297,0	3,64	Ji-Jian	1986	30132	[160]
0,750	0,250	1346,0	3,18	Ji-Jian	1986	30132	[160]
0,750	0,250	1400,0	2,58	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,762	0,238	908,0	8,84	Shartsis	1952	3144	[112]
0,762	0,238	1005,0	7,14	Shartsis	1952	3144	[112]

A. Anhang

SiO ₂ [wt%]	K ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,762	0,238	1103,0	5,71	Shartsis	1952	3144	[112]
0,762	0,238	1202,0	4,61	Shartsis	1952	3144	[112]
0,762	0,238	1307,0	3,59	Shartsis	1952	3144	[112]
0,762	0,238	1403,0	2,65	Shartsis	1952	3144	[112]
0,785	0,215	900,0	9,19	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,785	0,215	1000,0	7,46	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,785	0,215	1100,0	6,01	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,785	0,215	1200,0	4,88	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,785	0,215	1300,0	3,96	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,785	0,215	1400,0	3,20	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,786	0,214	904,0	9,12	Shartsis	1952	3144	[112]
0,786	0,214	998,0	7,35	Shartsis	1952	3144	[112]
0,786	0,214	1101,0	5,94	Shartsis	1952	3144	[112]
0,786	0,214	1204,0	4,84	Shartsis	1952	3144	[112]
0,786	0,214	1294,0	3,94	Shartsis	1952	3144	[112]
0,786	0,214	1428,0	2,79	Shartsis	1952	3144	[112]
0,800	0,200	776,0	11,51	Ivanov	1969	3330	[156], [157]
0,800	0,200	800,0	11,05	Saringyulyan	1970	3561	[107], [108] , [109], [110], [111]
0,800	0,200	1000,0	7,21	Saringyulyan	1970	3561	[107], [108] , [109], [110], [111]
0,800	0,200	1000,0	7,32	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,800	0,200	1100,0	5,92	Saringyulyan	1970	3561	[107], [108] , [109], [110], [111]
0,800	0,200	1200,0	4,84	Saringyulyan	1970	3561	[107], [108] , [109], [110], [111]
0,800	0,200	1300,0	3,85	Saringyulyan	1970	3561	[107], [108] , [109], [110], [111]
0,800	0,200	1300,0	3,91	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,800	0,200	1400,0	3,04	Saringyulyan	1970	3561	[107], [108] , [109], [110], [111]
0,800	0,200	1450,0	2,67	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,802	0,198	900,0	9,46	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,802	0,198	1000,0	7,62	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,802	0,198	1100,0	6,12	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,802	0,198	1200,0	5,02	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,802	0,198	1300,0	4,12	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,802	0,198	1400,0	3,34	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,812	0,188	906,0	9,49	Shartsis	1952	3144	[112]
0,812	0,188	998,0	7,74	Shartsis	1952	3144	[112]
0,812	0,188	1098,0	6,38	Shartsis	1952	3144	[112]
0,812	0,188	1197,0	5,23	Shartsis	1952	3144	[112]
0,812	0,188	1294,0	4,24	Shartsis	1952	3144	[112]
0,812	0,188	1397,0	3,34	Shartsis	1952	3144	[112]

A. Anhang

SiO ₂	K ₂ O	T	ln(η)	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
[wt%]		[°C]	[Pas]				
0,825	0,175	900,0	9,79	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,825	0,175	1000,0	7,83	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,825	0,175	1100,0	6,38	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,825	0,175	1200,0	5,25	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,825	0,175	1300,0	4,28	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,825	0,175	1400,0	3,52	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,833	0,167	1001,0	8,04	Shartsis	1952	3144	[112]
0,833	0,167	1100,0	6,59	Shartsis	1952	3144	[112]
0,833	0,167	1202,0	5,41	Shartsis	1952	3144	[112]
0,833	0,167	1305,0	4,40	Shartsis	1952	3144	[112]
0,833	0,167	1393,0	3,71	Shartsis	1952	3144	[112]
0,836	0,164	1000,0	8,04	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,836	0,164	1100,0	6,59	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,836	0,164	1200,0	5,39	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,836	0,164	1300,0	4,49	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,836	0,164	1400,0	3,71	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,850	0,150	1300,0	4,58	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,850	0,150	1450,0	3,41	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,857	0,143	1100,0	7,05	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,857	0,143	1200,0	5,78	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,857	0,143	1300,0	4,81	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,857	0,143	1400,0	4,01	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,874	0,126	1300,0	5,11	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,874	0,126	1400,0	4,28	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,886	0,114	1300,0	5,37	Pohlmann	1976	9508	[106]
0,886	0,114	1400,0	4,47	Pohlmann	1976	9508	[106]

System SiO₂-Al₂O₃-Na₂O

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	T	ln(η)	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
	[wt%]		[°C]	[Pas]				
0,479	0,103	0,418	979,0	4,77	Dingwell	1986	2012	[122]
0,479	0,103	0,418	1029,0	4,10	Dingwell	1986	2012	[122]
0,479	0,103	0,418	1076,0	3,52	Dingwell	1986	2012	[122]
0,479	0,103	0,418	1130,0	2,92	Dingwell	1986	2012	[122]
0,479	0,103	0,418	1178,0	2,44	Dingwell	1986	2012	[122]
0,479	0,103	0,418	1229,0	1,96	Dingwell	1986	2012	[122]

SiO ₂	Al ₂ O ₃ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,479	0,103	0,418	1314,0	1,17	Dingwell	1986	2012	[122]
0,498	0,245	0,256	1547,0	3,62	Toplis	1997	28793	[163]
0,498	0,245	0,256	1572,0	3,34	Toplis	1997	28793	[163]
0,498	0,245	0,256	1596,0	3,09	Toplis	1997	28793	[163]
0,498	0,245	0,256	1621,0	2,81	Toplis	1997	28793	[163]
0,498	0,245	0,256	1646,0	2,56	Toplis	1997	28793	[163]
0,498	0,257	0,245	1547,0	3,64	Toplis	1997	28793	[163]
0,498	0,257	0,245	1572,0	3,36	Toplis	1997	28793	[163]
0,498	0,257	0,245	1596,0	3,09	Toplis	1997	28793	[163]
0,498	0,257	0,245	1621,0	2,81	Toplis	1997	28793	[163]
0,498	0,257	0,245	1646,0	2,56	Toplis	1997	28793	[163]
0,500	0,226	0,274	1600,0	2,76	Toplis	1998	24506	[164]
0,500	0,237	0,263	1600,0	3,02	Toplis	1998	24506	[164]
0,500	0,245	0,255	1600,0	3,09	Toplis	1998	24506	[164]
0,500	0,256	0,244	1600,0	3,09	Toplis	1998	24506	[164]
0,500	0,267	0,233	1600,0	3,02	Toplis	1998	24506	[164]
0,500	0,281	0,219	1600,0	2,92	Toplis	1998	24506	[164]
0,535	0,066	0,399	995,0	4,44	Dingwell	1986	2012	[122]
0,535	0,066	0,399	1048,0	3,82	Dingwell	1986	2012	[122]
0,535	0,066	0,399	1095,0	3,25	Dingwell	1986	2012	[122]
0,535	0,066	0,399	1142,0	2,76	Dingwell	1986	2012	[122]
0,535	0,066	0,399	1190,0	2,30	Dingwell	1986	2012	[122]
0,535	0,066	0,399	1240,0	1,89	Dingwell	1986	2012	[122]
0,535	0,066	0,399	1287,0	1,47	Dingwell	1986	2012	[122]
0,535	0,066	0,399	1345,0	1,06	Dingwell	1986	2012	[122]
0,591	0,193	0,216	1397,0	6,61	Toplis	1997	28793	[163]
0,591	0,193	0,216	1446,0	5,92	Toplis	1997	28793	[163]
0,591	0,193	0,216	1495,0	5,27	Toplis	1997	28793	[163]
0,591	0,193	0,216	1544,0	4,70	Toplis	1997	28793	[163]
0,591	0,193	0,216	1594,0	4,14	Toplis	1997	28793	[163]
0,591	0,193	0,216	1623,0	3,80	Toplis	1997	28793	[163]
0,596	0,201	0,203	1397,0	7,02	Toplis	1997	28793	[163]
0,596	0,201	0,203	1446,0	6,26	Toplis	1997	28793	[163]
0,596	0,201	0,203	1495,0	5,55	Toplis	1997	28793	[163]
0,596	0,201	0,203	1544,0	4,90	Toplis	1997	28793	[163]
0,596	0,201	0,203	1594,0	4,31	Toplis	1997	28793	[163]
0,596	0,201	0,203	1643,0	3,73	Toplis	1997	28793	[163]
0,596	0,211	0,193	1397,0	7,16	Toplis	1997	28793	[163]

A. Anhang

SiO ₂	Al ₂ O ₃ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,596	0,211	0,193	1446,0	6,36	Toplis	1997	28793	[163]
0,596	0,211	0,193	1495,0	5,64	Toplis	1997	28793	[163]
0,596	0,211	0,193	1544,0	4,97	Toplis	1997	28793	[163]
0,596	0,211	0,193	1594,0	4,33	Toplis	1997	28793	[163]
0,596	0,211	0,193	1643,0	3,78	Toplis	1997	28793	[163]
0,598	0,035	0,367	995,0	4,44	Dingwell	1986	2012	[122]
0,598	0,035	0,367	1035,0	4,05	Dingwell	1986	2012	[122]
0,598	0,035	0,367	1085,0	3,57	Dingwell	1986	2012	[122]
0,598	0,035	0,367	1140,0	2,99	Dingwell	1986	2012	[122]
0,598	0,035	0,367	1185,0	2,56	Dingwell	1986	2012	[122]
0,598	0,035	0,367	1235,0	2,12	Dingwell	1986	2012	[122]
0,598	0,035	0,367	1280,0	1,73	Dingwell	1986	2012	[122]
0,598	0,035	0,367	1330,0	1,36	Dingwell	1986	2012	[122]
0,600	0,200	0,200	1398,0	7,85	Sakka	1981	6868	[165]
0,600	0,200	0,200	1451,0	6,93	Sakka	1981	6868	[165]
0,636	0,017	0,347	1008,0	4,65	Dingwell	1986	2012	[122]
0,636	0,017	0,347	1055,0	4,10	Dingwell	1986	2012	[122]
0,636	0,017	0,347	1105,0	3,57	Dingwell	1986	2012	[122]
0,636	0,017	0,347	1150,0	3,09	Dingwell	1986	2012	[122]
0,636	0,017	0,347	1200,0	2,62	Dingwell	1986	2012	[122]
0,636	0,017	0,347	1255,0	2,21	Dingwell	1986	2012	[122]
0,636	0,017	0,347	1300,0	1,80	Dingwell	1986	2012	[122]
0,636	0,017	0,347	1350,0	1,45	Dingwell	1986	2012	[122]
0,650	0,100	0,250	1000,0	7,44	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,650	0,100	0,250	1200,0	4,95	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,650	0,100	0,250	1400,0	3,22	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,655	0,170	0,174	1200,0	11,63	Stein	1993	15620	[166]
0,655	0,170	0,174	1225,0	11,14	Stein	1993	15620	[166]
0,655	0,170	0,174	1250,0	10,41	Stein	1993	15620	[166]
0,655	0,170	0,174	1275,0	10,11	Stein	1993	15620	[166]
0,661	0,040	0,299	1023,0	5,50	Lotto	1966	15031	[154]
0,661	0,040	0,299	1145,0	4,10	Lotto	1966	15031	[154]
0,661	0,040	0,299	1246,0	3,18	Lotto	1966	15031	[154]
0,661	0,040	0,299	1354,0	2,33	Lotto	1966	15031	[154]
0,661	0,040	0,299	1433,0	1,77	Lotto	1966	15031	[154]
0,667	0,022	0,311	900,0	6,84	Hunold	1980	9332	[153]
0,667	0,022	0,311	1100,0	4,08	Hunold	1980	9332	[153]
0,667	0,022	0,311	1300,0	2,35	Hunold	1980	9332	[153]

SiO ₂	Al ₂ O ₃ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,667	0,022	0,311	1500,0	1,15	Hunold	1980	9332	[153]
0,668	0,100	0,232	900,0	9,95	Hunold	1980	9332	[153]
0,668	0,100	0,232	1100,0	6,49	Hunold	1980	9332	[153]
0,668	0,100	0,232	1300,0	4,26	Hunold	1980	9332	[153]
0,668	0,100	0,232	1500,0	2,79	Hunold	1980	9332	[153]
0,669	0,175	0,156	1300,0	9,69	Hunold	1980	9332	[153]
0,669	0,175	0,156	1500,0	6,59	Hunold	1980	9332	[153]
0,669	0,179	0,152	1500,0	6,93	Hunold	1980	9332	[153]
0,670	0,148	0,182	1600,0	4,37	Toplis	1998	24506	[164]
0,670	0,166	0,164	1300,0	8,57	Hunold	1980	9332	[153]
0,670	0,166	0,164	1500,0	5,80	Hunold	1980	9332	[153]
0,670	0,168	0,162	1600,0	5,11	Toplis	1998	24506	[164]
0,670	0,175	0,155	1600,0	5,34	Toplis	1998	24506	[164]
0,670	0,184	0,146	1500,0	6,68	Hunold	1980	9332	[153]
0,670	0,185	0,145	1600,0	5,13	Toplis	1998	24506	[164]
0,671	0,151	0,178	1100,0	9,26	Hunold	1980	9332	[153]
0,671	0,151	0,178	1300,0	6,49	Hunold	1980	9332	[153]
0,671	0,151	0,178	1500,0	4,42	Hunold	1980	9332	[153]
0,671	0,167	0,162	1396,0	7,92	Toplis	1997	28793	[163]
0,671	0,167	0,162	1446,0	7,16	Toplis	1997	28793	[163]
0,671	0,167	0,162	1495,0	6,42	Toplis	1997	28793	[163]
0,671	0,167	0,162	1544,0	5,76	Toplis	1997	28793	[163]
0,671	0,167	0,162	1594,0	5,11	Toplis	1997	28793	[163]
0,671	0,167	0,162	1643,0	4,51	Toplis	1997	28793	[163]
0,671	0,190	0,139	1500,0	6,59	Hunold	1980	9332	[153]
0,672	0,075	0,253	900,0	8,66	Hunold	1980	9332	[153]
0,672	0,075	0,253	1100,0	5,55	Hunold	1980	9332	[153]
0,672	0,075	0,253	1300,0	3,64	Hunold	1980	9332	[153]
0,672	0,075	0,253	1500,0	2,35	Hunold	1980	9332	[153]
0,672	0,160	0,167	1120,0	13,88	Stein	1993	15620	[166]
0,672	0,160	0,167	1125,0	13,26	Stein	1993	15620	[166]
0,672	0,160	0,167	1140,0	13,38	Stein	1993	15620	[166]
0,672	0,160	0,167	1150,0	12,66	Stein	1993	15620	[166]
0,672	0,160	0,167	1160,0	12,80	Stein	1993	15620	[166]
0,672	0,160	0,167	1175,0	12,02	Stein	1993	15620	[166]
0,672	0,160	0,167	1180,0	12,39	Stein	1993	15620	[166]
0,672	0,160	0,167	1200,0	11,40	Stein	1993	15620	[166]
0,672	0,160	0,167	1200,0	11,86	Stein	1993	15620	[166]

A. Anhang

SiO ₂	Al ₂ O ₃ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,672	0,160	0,167	1220,0	11,35	Stein	1993	15620	[166]
0,672	0,160	0,167	1225,0	10,96	Stein	1993	15620	[166]
0,672	0,160	0,167	1250,0	10,50	Stein	1993	15620	[166]
0,672	0,170	0,157	1300,0	9,16	Hunold	1980	9332	[153]
0,672	0,170	0,157	1500,0	6,33	Hunold	1980	9332	[153]
0,673	0,121	0,206	1100,0	7,35	Hunold	1980	9332	[153]
0,673	0,121	0,206	1300,0	5,11	Hunold	1980	9332	[153]
0,673	0,121	0,206	1500,0	3,57	Hunold	1980	9332	[153]
0,675	0,075	0,250	1000,0	6,95	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,675	0,075	0,250	1200,0	4,58	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,675	0,075	0,250	1400,0	2,92	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,676	0,146	0,177	1298,0	7,74	Toplis	1996	20564	[167]
0,676	0,146	0,177	1347,0	7,09	Toplis	1996	20564	[167]
0,676	0,146	0,177	1396,0	6,49	Toplis	1996	20564	[167]
0,676	0,146	0,177	1446,0	5,94	Toplis	1996	20564	[167]
0,676	0,146	0,177	1495,0	5,39	Toplis	1996	20564	[167]
0,676	0,146	0,177	1544,0	4,88	Toplis	1996	20564	[167]
0,676	0,146	0,177	1594,0	4,37	Toplis	1996	20564	[167]
0,676	0,147	0,178	1298,0	7,74	Toplis	1997	28793	[163]
0,676	0,147	0,178	1347,0	7,09	Toplis	1997	28793	[163]
0,676	0,147	0,178	1396,0	6,49	Toplis	1997	28793	[163]
0,676	0,147	0,178	1446,0	5,94	Toplis	1997	28793	[163]
0,676	0,147	0,178	1495,0	5,39	Toplis	1997	28793	[163]
0,676	0,147	0,178	1544,0	4,88	Toplis	1997	28793	[163]
0,676	0,147	0,178	1594,0	4,37	Toplis	1997	28793	[163]
0,677	0,095	0,227	1052,0	7,48	Toplis	1996	20564	[167]
0,677	0,095	0,227	1102,0	6,77	Toplis	1996	20564	[167]
0,677	0,095	0,227	1151,0	6,17	Toplis	1996	20564	[167]
0,677	0,095	0,227	1200,0	5,60	Toplis	1996	20564	[167]
0,677	0,095	0,227	1249,0	5,07	Toplis	1996	20564	[167]
0,677	0,095	0,227	1298,0	4,58	Toplis	1996	20564	[167]
0,677	0,095	0,227	1347,0	4,12	Toplis	1996	20564	[167]
0,677	0,095	0,227	1396,0	3,71	Toplis	1996	20564	[167]
0,677	0,095	0,227	1446,0	3,29	Toplis	1996	20564	[167]
0,677	0,095	0,227	1495,0	2,92	Toplis	1996	20564	[167]
0,677	0,171	0,152	1446,0	7,51	Toplis	1997	28793	[163]
0,677	0,171	0,152	1495,0	6,72	Toplis	1997	28793	[163]
0,677	0,171	0,152	1544,0	6,01	Toplis	1997	28793	[163]

A. Anhang

SiO ₂	Al ₂ O ₃ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,677	0,171	0,152	1594,0	5,34	Toplis	1997	28793	[163]
0,677	0,171	0,152	1652,0	4,61	Toplis	1997	28793	[163]
0,678	0,022	0,300	1026,0	5,27	Lotto	1966	15031	[154]
0,678	0,022	0,300	1107,0	4,33	Lotto	1966	15031	[154]
0,678	0,022	0,300	1208,0	3,34	Lotto	1966	15031	[154]
0,678	0,022	0,300	1313,0	2,49	Lotto	1966	15031	[154]
0,678	0,022	0,300	1426,0	1,70	Lotto	1966	15031	[154]
0,678	0,043	0,279	900,0	7,69	Hunold	1980	9332	[153]
0,678	0,043	0,279	1100,0	4,77	Hunold	1980	9332	[153]
0,678	0,043	0,279	1300,0	2,95	Hunold	1980	9332	[153]
0,678	0,043	0,279	1500,0	1,66	Hunold	1980	9332	[153]
0,678	0,125	0,197	1200,0	7,48	Toplis	1996	20564	[167]
0,678	0,125	0,197	1249,0	6,88	Toplis	1996	20564	[167]
0,678	0,125	0,197	1298,0	6,31	Toplis	1996	20564	[167]
0,678	0,125	0,197	1347,0	5,78	Toplis	1996	20564	[167]
0,678	0,125	0,197	1396,0	5,30	Toplis	1996	20564	[167]
0,678	0,125	0,197	1446,0	4,84	Toplis	1996	20564	[167]
0,678	0,125	0,197	1495,0	4,40	Toplis	1996	20564	[167]
0,678	0,125	0,197	1544,0	3,98	Toplis	1996	20564	[167]
0,678	0,125	0,197	1594,0	3,57	Toplis	1996	20564	[167]
0,695	0,154	0,151	1100,0	14,81	Stein	1993	15620	[166]
0,695	0,154	0,151	1125,0	14,25	Stein	1993	15620	[166]
0,695	0,154	0,151	1150,0	13,56	Stein	1993	15620	[166]
0,695	0,154	0,151	1175,0	12,83	Stein	1993	15620	[166]
0,695	0,154	0,151	1200,0	12,18	Stein	1993	15620	[166]
0,695	0,154	0,151	1225,0	11,77	Stein	1993	15620	[166]
0,695	0,154	0,151	1250,0	11,40	Stein	1993	15620	[166]
0,695	0,154	0,151	1275,0	10,82	Stein	1993	15620	[166]
0,695	0,154	0,151	1300,0	10,43	Stein	1993	15620	[166]
0,700	0,050	0,250	1000,0	6,61	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,700	0,050	0,250	1200,0	4,31	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,700	0,050	0,250	1400,0	2,69	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,700	0,100	0,200	1099,0	9,00	Sakka	1981	6867	[168]
0,700	0,100	0,200	1150,0	8,24	Sakka	1981	6867	[168]
0,700	0,100	0,200	1208,0	7,64	Sakka	1981	6867	[168]
0,700	0,100	0,200	1248,0	7,16	Sakka	1981	6867	[168]
0,700	0,100	0,200	1295,0	6,75	Sakka	1981	6867	[168]
0,700	0,100	0,200	1349,0	6,08	Sakka	1981	6867	[168]

A. Anhang

SiO ₂	Al ₂ O ₃ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,713	0,039	0,248	1176,0	4,28	Lotto	1966	15031	[154]
0,713	0,039	0,248	1227,0	3,80	Lotto	1966	15031	[154]
0,713	0,039	0,248	1319,0	3,02	Lotto	1966	15031	[154]
0,713	0,039	0,248	1377,0	2,58	Lotto	1966	15031	[154]
0,725	0,020	0,255	1138,0	4,56	Lotto	1966	15031	[154]
0,725	0,020	0,255	1215,0	3,78	Lotto	1966	15031	[154]
0,725	0,020	0,255	1270,0	3,32	Lotto	1966	15031	[154]
0,725	0,020	0,255	1328,0	2,81	Lotto	1966	15031	[154]
0,725	0,020	0,255	1391,0	2,37	Lotto	1966	15031	[154]
0,725	0,020	0,255	1445,0	2,03	Lotto	1966	15031	[154]
0,730	0,135	0,135	1120,0	15,40	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1130,0	15,13	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1140,0	14,81	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1140,0	14,97	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1150,0	14,58	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1160,0	14,28	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1160,0	14,39	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1175,0	13,95	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1180,0	13,95	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1200,0	13,45	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1200,0	13,49	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1225,0	12,73	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1225,0	12,85	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1250,0	12,04	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1250,0	12,18	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1275,0	11,51	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1275,0	11,61	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1300,0	11,10	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1300,0	11,17	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1325,0	10,73	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1350,0	10,06	Stein	1993	15620	[166]
0,730	0,135	0,135	1350,0	10,29	Stein	1993	15620	[166]
0,741	0,131	0,128	1125,0	14,85	Stein	1993	15620	[166]
0,741	0,131	0,128	1150,0	14,11	Stein	1993	15620	[166]
0,741	0,131	0,128	1175,0	13,49	Stein	1993	15620	[166]
0,741	0,131	0,128	1200,0	12,87	Stein	1993	15620	[166]
0,741	0,131	0,128	1225,0	12,27	Stein	1993	15620	[166]
0,741	0,131	0,128	1250,0	11,70	Stein	1993	15620	[166]

A. Anhang

SiO ₂	Al ₂ O ₃ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,741	0,131	0,128	1275,0	11,08	Stein	1993	15620	[166]
0,741	0,131	0,128	1300,0	10,80	Stein	1993	15620	[166]
0,747	0,135	0,119	1349,0	10,75	Toplis	1997	28793	[163]
0,747	0,135	0,119	1399,0	9,79	Toplis	1997	28793	[163]
0,747	0,135	0,119	1448,0	8,89	Toplis	1997	28793	[163]
0,747	0,135	0,119	1497,0	8,06	Toplis	1997	28793	[163]
0,747	0,135	0,119	1547,0	7,30	Toplis	1997	28793	[163]
0,747	0,135	0,119	1596,0	6,61	Toplis	1997	28793	[163]
0,747	0,135	0,119	1621,0	6,26	Toplis	1997	28793	[163]
0,750	0,125	0,125	1123,5	15,61	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	1160,0	14,98	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1174,0	14,37	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	1227,0	13,45	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1230,6	13,10	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	1277,2	11,97	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	1292,0	11,99	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1294,2	11,58	Cranmer	1981	15479	[121]
0,750	0,125	0,125	1300,0	11,61	Kozu	1944	2561	[117]
0,750	0,125	0,125	1300,0	11,61	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,125	1321,7	11,21	Cranmer	1981	15479	[121]
0,750	0,125	0,125	1325,0	11,17	Kozu	1944	2561	[117]
0,750	0,125	0,125	1325,0	11,17	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,125	1339,0	10,92	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1350,0	10,68	Kozu	1944	2561	[117]
0,750	0,125	0,125	1350,0	10,68	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,125	1350,2	10,61	Cranmer	1981	15479	[121]
0,750	0,125	0,125	1368,9	10,32	Cranmer	1981	15479	[121]
0,750	0,125	0,125	1375,0	10,25	Kozu	1944	2561	[117]
0,750	0,125	0,125	1375,0	10,25	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,125	1379,7	10,11	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	1393,5	9,92	Cranmer	1981	15479	[121]
0,750	0,125	0,125	1400,0	9,39	Scarfe	1986	29425	[119]
0,750	0,125	0,125	1400,0	9,79	Kozu	1944	2561	[117]
0,750	0,125	0,125	1400,0	9,79	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,125	1409,0	9,65	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1421,8	9,23	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	1421,8	9,49	Cranmer	1981	15479	[121]
0,750	0,125	0,125	1425,0	9,03	Scarfe	1986	29425	[119]

A. Anhang

SiO ₂	Al ₂ O ₃ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,750	0,125	0,125	1425,0	9,35	Kozu	1944	2561	[117]
0,750	0,125	0,125	1425,0	9,35	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,125	1437,0	9,09	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1450,0	8,69	Scarfe	1986	29425	[119]
0,750	0,125	0,125	1475,0	8,34	Scarfe	1986	29425	[119]
0,750	0,125	0,125	1488,0	8,35	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1490,5	8,40	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	1500,0	7,97	Scarfe	1986	29425	[119]
0,750	0,125	0,125	1525,0	7,63	Scarfe	1986	29425	[119]
0,750	0,125	0,125	1531,9	7,78	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	1538,0	7,58	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1550,0	7,26	Scarfe	1986	29425	[119]
0,750	0,125	0,125	1575,0	6,91	Scarfe	1986	29425	[119]
0,750	0,125	0,125	1582,1	6,98	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	1583,0	6,84	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1600,0	6,59	Scarfe	1986	29425	[119]
0,750	0,125	0,125	1614,0	6,56	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1651,0	6,08	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1667,0	5,83	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1672,4	5,71	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	1720,0	5,27	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1730,0	5,13	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1944,1	3,52	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	2090,9	2,28	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	2220,6	1,34	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	2386,4	0,71	Neuville	1990	14792	[118]
0,753	0,124	0,123	1349,0	10,50	Toplis	1997	28793	[163]
0,753	0,124	0,123	1399,0	9,62	Toplis	1997	28793	[163]
0,753	0,124	0,123	1448,0	8,77	Toplis	1997	28793	[163]
0,753	0,124	0,123	1497,0	7,97	Toplis	1997	28793	[163]
0,753	0,124	0,123	1547,0	7,25	Toplis	1997	28793	[163]
0,753	0,124	0,123	1596,0	6,56	Toplis	1997	28793	[163]
0,753	0,124	0,123	1621,0	6,24	Toplis	1997	28793	[163]
0,755	0,115	0,130	1250,0	10,64	Toplis	1997	28793	[163]
0,755	0,115	0,130	1300,0	9,83	Toplis	1997	28793	[163]
0,755	0,115	0,130	1349,0	9,10	Toplis	1997	28793	[163]
0,755	0,115	0,130	1399,0	8,43	Toplis	1997	28793	[163]
0,755	0,115	0,130	1448,0	7,76	Toplis	1997	28793	[163]

SiO ₂	Al ₂ O ₃ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,755	0,115	0,130	1497,0	7,16	Toplis	1997	28793	[163]
0,755	0,115	0,130	1547,0	6,61	Toplis	1997	28793	[163]
0,755	0,115	0,130	1596,0	6,06	Toplis	1997	28793	[163]
0,780	0,111	0,109	1125,0	15,84	Stein	1993	15620	[166]
0,780	0,111	0,109	1150,0	15,29	Stein	1993	15620	[166]
0,780	0,111	0,109	1175,0	14,67	Stein	1993	15620	[166]
0,780	0,111	0,109	1200,0	14,05	Stein	1993	15620	[166]
0,780	0,111	0,109	1225,0	13,26	Stein	1993	15620	[166]
0,780	0,111	0,109	1250,0	12,73	Stein	1993	15620	[166]
0,780	0,111	0,109	1275,0	12,11	Stein	1993	15620	[166]
0,780	0,111	0,109	1300,0	11,74	Stein	1993	15620	[166]
0,815	0,088	0,097	1300,0	11,10	Toplis	1997	28793	[163]
0,815	0,088	0,097	1349,0	10,32	Toplis	1997	28793	[163]
0,815	0,088	0,097	1399,0	9,60	Toplis	1997	28793	[163]
0,815	0,088	0,097	1448,0	8,89	Toplis	1997	28793	[163]
0,815	0,088	0,097	1497,0	8,22	Toplis	1997	28793	[163]
0,815	0,088	0,097	1547,0	7,60	Toplis	1997	28793	[163]
0,815	0,088	0,097	1596,0	7,02	Toplis	1997	28793	[163]
0,815	0,088	0,097	1621,0	6,72	Toplis	1997	28793	[163]
0,819	0,090	0,090	1399,0	10,82	Toplis	1997	28793	[163]
0,819	0,090	0,090	1448,0	9,95	Toplis	1997	28793	[163]
0,819	0,090	0,090	1497,0	9,12	Toplis	1997	28793	[163]
0,819	0,090	0,090	1547,0	8,38	Toplis	1997	28793	[163]
0,819	0,090	0,090	1596,0	7,67	Toplis	1997	28793	[163]
0,819	0,094	0,087	1399,0	11,21	Toplis	1997	28793	[163]
0,819	0,094	0,087	1448,0	10,29	Toplis	1997	28793	[163]
0,819	0,094	0,087	1497,0	9,44	Toplis	1997	28793	[163]
0,819	0,094	0,087	1547,0	8,63	Toplis	1997	28793	[163]
0,819	0,094	0,087	1596,0	7,85	Toplis	1997	28793	[163]
0,819	0,094	0,087	1645,0	7,18	Toplis	1997	28793	[163]
0,831	0,085	0,084	1100,0	17,82	Stein	1993	15620	[166]
0,831	0,085	0,084	1125,0	17,15	Stein	1993	15620	[166]
0,831	0,085	0,084	1150,0	16,44	Stein	1993	15620	[166]
0,831	0,085	0,084	1175,0	15,84	Stein	1993	15620	[166]
0,831	0,085	0,084	1200,0	15,27	Stein	1993	15620	[166]
0,831	0,085	0,084	1225,0	14,64	Stein	1993	15620	[166]
0,831	0,085	0,084	1250,0	14,05	Stein	1993	15620	[166]
0,831	0,085	0,084	1275,0	13,35	Stein	1993	15620	[166]

A. Anhang

SiO ₂	Al ₂ O ₃ [wt%]	Na ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,831	0,085	0,084	1300,0	12,73	Stein	1993	15620	[166]

System SiO₂-Al₂O₃-K₂O

SiO ₂	Al ₂ O ₃ [wt%]	K ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,550	0,025	0,425	1250,0	1,44	Mizoguchi	1982	3353	[123]
0,550	0,025	0,425	1300,0	1,11	Mizoguchi	1982	3353	[123]
0,550	0,025	0,425	1350,0	0,79	Mizoguchi	1982	3353	[123]
0,550	0,025	0,425	1400,0	0,49	Mizoguchi	1982	3353	[123]
0,550	0,050	0,400	1350,0	1,65	Mizoguchi	1982	3353	[123]
0,550	0,050	0,400	1400,0	1,30	Mizoguchi	1982	3353	[123]
0,600	0,025	0,375	1250,0	2,48	Mizoguchi	1982	3353	[123]
0,600	0,025	0,375	1300,0	2,17	Mizoguchi	1982	3353	[123]
0,600	0,025	0,375	1350,0	1,87	Mizoguchi	1982	3353	[123]
0,600	0,025	0,375	1400,0	1,60	Mizoguchi	1982	3353	[123]
0,600	0,050	0,350	1300,0	2,83	Mizoguchi	1982	3353	[123]
0,600	0,050	0,350	1350,0	2,46	Mizoguchi	1982	3353	[123]
0,600	0,050	0,350	1400,0	2,12	Mizoguchi	1982	3353	[123]
0,650	0,025	0,325	1350,0	2,67	Mizoguchi	1982	3353	[123]
0,650	0,025	0,325	1400,0	2,31	Mizoguchi	1982	3353	[123]
0,650	0,100	0,250	1400,0	4,81	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,675	0,075	0,250	1200,0	6,54	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,675	0,075	0,250	1400,0	4,28	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,700	0,050	0,250	1000,0	8,73	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,700	0,050	0,250	1200,0	5,83	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,700	0,050	0,250	1400,0	3,75	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,750	0,125	0,125	1575,0	7,99	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1581,0	7,86	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1582,1	7,85	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	1661,0	6,83	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1672,4	6,29	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	1675,0	6,23	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1749,0	5,17	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1784,5	5,02	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	1794,0	4,77	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1822,0	4,64	Urbain	1982	3483	[120]

A. Anhang

SiO ₂	Al ₂ O ₃ [wt%]	K ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,750	0,125	0,125	1825,0	4,34	Urbain	1982	3483	[120]
0,750	0,125	0,125	1944,1	3,34	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	2074,3	1,89	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	2239,4	0,90	Neuville	1990	14792	[118]
0,750	0,125	0,125	2393,5	0,02	Neuville	1990	14792	[118]

System SiO₂-Na₂O-K₂O

SiO ₂	Na ₂ O [wt%]	K ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,667	0,067	0,266	1000,0	5,60	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,667	0,067	0,266	1300,0	2,46	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,667	0,117	0,216	1000,0	5,18	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,667	0,117	0,216	1300,0	2,28	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,667	0,167	0,166	800,0	7,99	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,667	0,167	0,166	1000,0	4,97	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,667	0,167	0,166	1300,0	2,12	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,667	0,216	0,116	800,0	7,85	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,667	0,216	0,116	1000,0	4,79	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,667	0,216	0,116	1300,0	2,03	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,667	0,266	0,067	800,0	7,83	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,667	0,266	0,067	1000,0	4,72	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,667	0,266	0,067	1300,0	2,05	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,743	0,072	0,185	1050,0	5,60	Mackenzie	1957	16338	[127]
0,743	0,072	0,185	1100,0	5,02	Mackenzie	1957	16338	[127]
0,743	0,072	0,185	1150,0	4,47	Mackenzie	1957	16338	[127]
0,743	0,072	0,185	1200,0	4,00	Mackenzie	1957	16338	[127]
0,743	0,072	0,185	1250,0	3,51	Mackenzie	1957	16338	[127]
0,743	0,072	0,185	1300,0	3,03	Mackenzie	1957	16338	[127]
0,743	0,072	0,185	1350,0	2,63	Mackenzie	1957	16338	[127]
0,743	0,072	0,185	1400,0	2,26	Mackenzie	1957	16338	[127]
0,750	0,063	0,188	1000,0	6,17	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,750	0,063	0,188	1200,0	3,91	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,750	0,063	0,188	1400,0	2,28	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,750	0,125	0,125	1000,0	5,92	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,750	0,125	0,125	1200,0	3,73	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,750	0,125	0,125	1400,0	2,16	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]

A. Anhang

SiO ₂	Na ₂ O [wt%]	K ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,750	0,187	0,063	1000,0	5,83	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,750	0,187	0,063	1200,0	3,68	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,750	0,187	0,063	1400,0	2,14	Kim	1995	8101	[104], [158], [159]
0,800	0,065	0,135	1000,0	6,59	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,800	0,065	0,135	1300,0	3,45	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,800	0,065	0,135	1450,0	2,35	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,800	0,100	0,100	1000,0	6,40	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,800	0,100	0,100	1000,0	7,11	Sasek	1975	3317	[124], [125], [126]
0,800	0,100	0,100	1200,0	4,77	Sasek	1975	3317	[124], [125], [126]
0,800	0,100	0,100	1300,0	3,38	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,800	0,100	0,100	1400,0	3,22	Sasek	1975	3317	[124], [125], [126]
0,800	0,100	0,100	1450,0	2,33	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,800	0,135	0,065	1000,0	6,63	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,800	0,135	0,065	1300,0	3,52	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,800	0,135	0,065	1450,0	2,39	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,850	0,050	0,100	1300,0	4,31	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,850	0,050	0,100	1450,0	3,25	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,850	0,075	0,075	1300,0	4,31	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,850	0,075	0,075	1450,0	3,13	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,850	0,100	0,050	1300,0	4,37	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]
0,850	0,100	0,050	1450,0	3,25	Vasiljev	1977	7240	[113], [114]

System SiO₂-Al₂O₃-Na₂O-K₂O

SiO ₂	Al ₂ O ₃ [wt%]	Na ₂ O	K ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,650	0,100	0,062	0,188	1200,0	6,24	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,650	0,100	0,062	0,188	1400,0	4,24	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,650	0,100	0,125	0,125	1200,0	5,73	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,650	0,100	0,125	0,125	1400,0	3,91	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,650	0,100	0,188	0,063	1000,0	7,78	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,650	0,100	0,188	0,063	1200,0	5,37	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,650	0,100	0,188	0,063	1400,0	3,55	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,675	0,075	0,062	0,188	1200,0	5,62	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,675	0,075	0,062	0,188	1400,0	3,75	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,675	0,075	0,125	0,125	1000,0	7,58	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,675	0,075	0,125	0,125	1200,0	5,13	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]

A. Anhang

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	T	ln(η)	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
	[wt%]			[°C]	[Pas]				
0,675	0,075	0,125	0,125	1400,0	3,41	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,675	0,075	0,187	0,063	1000,0	7,21	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,675	0,075	0,187	0,063	1200,0	4,88	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,675	0,075	0,187	0,063	1400,0	3,15	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,688	0,156	0,108	0,048	1489,0	7,23	Urbain	1982	3483	[120]
0,688	0,156	0,108	0,048	1495,0	7,12	Urbain	1982	3483	[120]
0,688	0,156	0,108	0,048	1511,0	6,91	Urbain	1982	3483	[120]
0,688	0,156	0,108	0,048	1523,0	6,74	Urbain	1982	3483	[120]
0,688	0,156	0,108	0,048	1535,0	6,66	Urbain	1982	3483	[120]
0,688	0,156	0,108	0,048	1547,0	6,34	Urbain	1982	3483	[120]
0,688	0,156	0,108	0,048	1548,0	6,46	Urbain	1982	3483	[120]
0,688	0,156	0,108	0,048	1566,0	6,29	Urbain	1982	3483	[120]
0,688	0,156	0,108	0,048	1578,0	6,10	Urbain	1982	3483	[120]
0,688	0,156	0,108	0,048	1595,0	5,70	Urbain	1982	3483	[120]
0,688	0,156	0,108	0,048	1614,0	5,35	Urbain	1982	3483	[120]
0,688	0,156	0,108	0,048	1628,0	5,34	Urbain	1982	3483	[120]
0,688	0,156	0,108	0,048	1633,0	5,30	Urbain	1982	3483	[120]
0,688	0,156	0,108	0,048	1639,0	5,32	Urbain	1982	3483	[120]
0,688	0,156	0,108	0,048	1655,0	4,90	Urbain	1982	3483	[120]
0,700	0,050	0,063	0,187	1000,0	7,58	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,700	0,050	0,063	0,187	1200,0	5,07	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,700	0,050	0,063	0,187	1400,0	3,25	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,700	0,050	0,125	0,125	1000,0	7,00	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,700	0,050	0,125	0,125	1200,0	4,67	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,700	0,050	0,125	0,125	1400,0	2,99	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,700	0,050	0,188	0,062	1000,0	6,65	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,700	0,050	0,188	0,062	1200,0	4,37	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,700	0,050	0,188	0,062	1400,0	2,74	Kim	1995	8101	[104], [158] , [159]
0,750	0,125	0,026	0,099	1400,0	12,04	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,026	0,099	1425,0	11,56	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,026	0,099	1450,0	11,17	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,052	0,073	1350,0	12,20	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,052	0,073	1375,0	11,67	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,052	0,073	1400,0	11,24	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,052	0,073	1425,0	10,75	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,052	0,073	1450,0	10,38	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,077	0,048	1350,0	11,93	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,077	0,048	1375,0	11,56	Kani	1935	2563	[115], [116]

A. Anhang

SiO ₂	Al ₂ O ₃ [wt%]	Na ₂ O	K ₂ O	T [°C]	ln(η) [Pas]	Autor	Jahr	SciGlass-ID	Quelle
0,750	0,125	0,077	0,048	1400,0	11,05	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,077	0,048	1425,0	10,66	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,077	0,048	1450,0	10,13	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,101	0,024	1325,0	12,02	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,101	0,024	1350,0	11,56	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,101	0,024	1375,0	11,14	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,101	0,024	1400,0	10,73	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,101	0,024	1425,0	10,20	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,750	0,125	0,101	0,024	1450,0	9,79	Kani	1935	2563	[115], [116]
0,847	0,076	0,048	0,029	1397,0	11,28	Dingwell	1993	17008	[169]
0,847	0,076	0,048	0,029	1397,0	11,28	Dingwell	1992	24529	[170]
0,847	0,076	0,048	0,029	1446,0	10,43	Dingwell	1993	17008	[169]
0,847	0,076	0,048	0,029	1446,0	10,43	Dingwell	1992	24529	[170]
0,847	0,076	0,048	0,029	1495,0	9,56	Dingwell	1993	17008	[169]
0,847	0,076	0,048	0,029	1495,0	9,56	Dingwell	1992	24529	[170]
0,847	0,076	0,048	0,029	1544,0	8,77	Dingwell	1993	17008	[169]
0,847	0,076	0,048	0,029	1544,0	8,77	Dingwell	1992	24529	[170]
0,847	0,076	0,048	0,029	1594,0	8,24	Dingwell	1993	17008	[169]
0,847	0,076	0,048	0,029	1594,0	8,24	Dingwell	1992	24529	[170]
0,847	0,076	0,048	0,029	1643,0	7,46	Dingwell	1993	17008	[169]
0,847	0,076	0,048	0,029	1643,0	7,46	Dingwell	1992	24529	[170]
0,847	0,076	0,048	0,029	1692,0	6,86	Dingwell	1992	24529	[170]

Danksagung

Professor Singheiser danke ich für die Möglichkeit, diese Arbeit am Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK-2) der Forschungszentrum Jülich GmbH zu erstellen.

Meinem Betreuer Michael Müller danke ich ganz herzlich für die hervorragende und kollegiale Betreuung während meiner Promotionszeit. Durch seine Ratschläge und die fachlichen Diskussionen in jeder Phase der Arbeit hat er entscheidend zum Gelingen beigetragen.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Professor Klaus Hack für die Übernahme des Gutachtens und die sehr hilfreichen Diskussionen. Alexander Kondratiev gebührt besonderer Dank für die großartige Unterstützung bei der Entwicklung des Modells. Die Zusammenarbeit mit ihm während seines einwöchigen Aufenthalts hier in Deutschland hat sehr viel Spaß gemacht.

Weiterhin danke ich Günter Pütz, der mit seiner Erfahrung alle mechanischen Probleme im Zusammenhang mit dem Aufbau des Viskosimeters immer schnell gelöst hat.

Den Elektrikern Hans-Peter Zillikens, Hans Josef Nievelstein und Max Borzikov danke ich für die Unterstützung bei der Wartung und die Beantwortung aller Fragen im Zusammenhang mit der Elektrik meiner Versuchsstände.

Paul Joecken danke ich für die immer bestens funktionierende IT-Struktur und die Freiheit im Umgang mit der Hard- und Software während meiner Promotionszeit.

Außerdem danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Forschungszentrums, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonders danke ich meinen Kolleginnen und Kollegen, mit denen ich zusammengearbeitet habe und die für eine sehr angenehme Atmosphäre während der Arbeit aber auch außerhalb des Büros gesorgt haben.

Ein großes Dankeschön richte ich an meine Familie, die mich während der gesamten Promotionszeit toll unterstützt hat und immer hinter mir steht. Meiner Partnerin Stefanie Link danke ich an dieser Stelle für die Unterstützung und ganz besonders ihr Verständnis, dass ich in der Endphase sehr wenig Zeit für sie hatte.

1. **Einsatz von multispektralen Satellitenbilddaten in der Wasserhaushalts- und Stoffstrommodellierung – dargestellt am Beispiel des Rureinzugsgebietes**
von C. Montzka (2008), XX, 238 Seiten
ISBN: 978-3-89336-508-1
2. **Ozone Production in the Atmosphere Simulation Chamber SAPHIR**
by C. A. Richter (2008), XIV, 147 pages
ISBN: 978-3-89336-513-5
3. **Entwicklung neuer Schutz- und Kontaktierungsschichten für Hochtemperatur-Brennstoffzellen**
von T. Kiefer (2008), 138 Seiten
ISBN: 978-3-89336-514-2
4. **Optimierung der Reflektivität keramischer Wärmedämmschichten aus Yttrium-teilstabilisiertem Zirkoniumdioxid für den Einsatz auf metallischen Komponenten in Gasturbinen**
von A. Stuke (2008), X, 201 Seiten
ISBN: 978-3-89336-515-9
5. **Lichtstreuende Oberflächen, Schichten und Schichtsysteme zur Verbesserung der Lichteinkopplung in Silizium-Dünnschichtsolarzellen**
von M. Berginski (2008), XV, 171 Seiten
ISBN: 978-3-89336-516-6
6. **Politiksznarien für den Klimaschutz IV – Szenarien bis 2030**
hrsg.von P. Markewitz, F. Chr. Matthes (2008), 376 Seiten
ISBN 978-3-89336-518-0
7. **Untersuchungen zum Verschmutzungsverhalten rheinischer Braunkohlen in Kohledampferzeugern**
von A. Schlüter (2008), 164 Seiten
ISBN 978-3-89336-524-1
8. **Inorganic Microporous Membranes for Gas Separation in Fossil Fuel Power Plants**
by G. van der Donk (2008), VI, 120 pages
ISBN: 978-3-89336-525-8
9. **Sinterung von Zirkoniumdioxid-Elektrolyten im Mehrlagenverbund der oxidkeramischen Brennstoffzelle (SOFC)**
von R. Mücke (2008), VI, 165 Seiten
ISBN: 978-3-89336-529-6
10. **Safety Considerations on Liquid Hydrogen**
by K. Verfondern (2008), VIII, 167 pages
ISBN: 978-3-89336-530-2

11. **Kerosinreformierung für Luftfahrtanwendungen**
von R. C. Samsun (2008), VII, 218 Seiten
ISBN: 978-3-89336-531-9
12. **Der 4. Deutsche Wasserstoff Congress 2008 – Tagungsband**
hrsg. von D. Stolten, B. Emonts, Th. Grube (2008), 269 Seiten
ISBN: 978-3-89336-533-3
13. **Organic matter in Late Devonian sediments as an indicator for environmental changes**
by M. Klopisch (2008), XII, 188 pages
ISBN: 978-3-89336-534-0
14. **Entschwefelung von Mitteldestillaten für die Anwendung in mobilen Brennstoffzellen-Systemen**
von J. Latz (2008), XII, 215 Seiten
ISBN: 978-3-89336-535-7
15. **RED-IMPACT**
Impact of Partitioning, Transmutation and Waste Reduction Technologies on the Final Nuclear Waste Disposal
SYNTHESIS REPORT
ed. by W. von Lensa, R. Nabbi, M. Rossbach (2008), 178 pages
ISBN 978-3-89336-538-8
16. **Ferritic Steel Interconnectors and their Interactions with Ni Base Anodes in Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)**
by J. H. Froitzheim (2008), 169 pages
ISBN: 978-3-89336-540-1
17. **Integrated Modelling of Nutrients in Selected River Basins of Turkey**
Results of a bilateral German-Turkish Research Project
project coord. M. Karpuzcu, F. Wendland (2008), XVI, 183 pages
ISBN: 978-3-89336-541-8
18. **Isotopengeochemische Studien zur klimatischen Ausprägung der Jünger Dryas in terrestrischen Archiven Eurasiens**
von J. Parplies (2008), XI, 155 Seiten, Anh.
ISBN: 978-3-89336-542-5
19. **Untersuchungen zur Klimavariabilität auf dem Tibetischen Plateau - Ein Beitrag auf der Basis stabiler Kohlenstoff- und Sauerstoffisotope in Jahrringen von Bäumen waldgrenznaher Standorte**
von J. Griessinger (2008), XIII, 172 Seiten
ISBN: 978-3-89336-544-9

20. **Neutron-Irradiation + Helium Hardening & Embrittlement Modeling of 9%Cr-Steels in an Engineering Perspective (HELENA)**
by R. Chaouadi (2008), VIII, 139 pages
ISBN: 978-3-89336-545-6
21. **in Bearbeitung**
22. **Verbundvorhaben APAWAGS (AOEV und Wassergenerierung) – Teilprojekt: Brennstoffreformierung – Schlussbericht**
von R. Peters, R. C. Samsun, J. Pasel, Z. Porš, D. Stolten (2008), VI, 106 Seiten
ISBN: 978-3-89336-547-0
23. **FREEVAL**
Evaluation of a Fire Radiative Power Product derived from Meteosat 8/9 and Identification of Operational User Needs
Final Report
project coord. M. Schultz, M. Wooster (2008), 139 pages
ISBN: 978-3-89336-549-4
24. **Untersuchungen zum Alkaliverhalten unter Oxycoal-Bedingungen**
von C. Weber (2008), VII, 143, XII Seiten
ISBN: 978-3-89336-551-7
25. **Grundlegende Untersuchungen zur Freisetzung von Spurstoffen, Heißgaschemie, Korrosionsbeständigkeit keramischer Werkstoffe und Alkalirückhaltung in der Druckkohlenstaubfeuerung**
von M. Müller (2008), 207 Seiten
ISBN: 978-3-89336-552-4
26. **Analytik von ozoninduzierten phenolischen Sekundärmetaboliten in *Nicotiana tabacum* L. cv Bel W3 mittels LC-MS**
von I. Koch (2008), III, V, 153 Seiten
ISBN 978-3-89336-553-1
27. **IEF-3 Report 2009. Grundlagenforschung für die Anwendung**
(2009), ca. 230 Seiten
ISBN: 978-3-89336-554-8
28. **Influence of Composition and Processing in the Oxidation Behavior of MCrAlY-Coatings for TBC Applications**
by J. Toscano (2009), 168 pages
ISBN: 978-3-89336-556-2
29. **Modellgestützte Analyse signifikanter Phosphorbelastungen in hessischen Oberflächengewässern aus diffusen und punktuellen Quellen**
von B. Tetzlaff (2009), 149 Seiten
ISBN: 978-3-89336-557-9

30. **Nickelreaktivlot / Oxidkeramik – Fügungen als elektrisch isolierende Dichtungskonzepte für Hochtemperatur-Brennstoffzellen-Stacks**
von S. Zügner (2009), 136 Seiten
ISBN: 978-3-89336-558-6
31. **Langzeitbeobachtung der Dosisbelastung der Bevölkerung in radioaktiv kontaminierten Gebieten Weißrusslands – Korma-Studie**
von H. Dederichs, J. Pillath, B. Heuel-Fabianek, P. Hill, R. Lennartz (2009),
Getr. Pag.
ISBN: 978-3-89336-532-3
32. **Herstellung von Hochtemperatur-Brennstoffzellen über physikalische Gasphasenabscheidung**
von N. Jordán Escalona (2009), 148 Seiten
ISBN: 978-3-89336-532-3
33. **Real-time Digital Control of Plasma Position and Shape on the TEXTOR Tokamak**
by M. Mitri (2009), IV, 128 pages
ISBN: 978-3-89336-567-8
34. **Freisetzung und Einbindung von Alkalimetallverbindungen in kohlebefeuerten Kombikraftwerken**
von M. Müller (2009), 155 Seiten
ISBN: 978-3-89336-568-5
35. **Kosten von Brennstoffzellensystemen auf Massenbasis in Abhängigkeit von der Absatzmenge**
von J. Werhahn (2009), 242 Seiten
ISBN: 978-3-89336-569-2
36. **Einfluss von Reoxidationszyklen auf die Betriebsfestigkeit von anodengestützten Festoxid-Brennstoffzellen**
von M. Ettler (2009), 138 Seiten
ISBN: 978-3-89336-570-8
37. **Großflächige Plasmaabscheidung von mikrokristallinem Silizium für mikromorphe Dünnschichtsolarmodule**
von T. Kilper (2009), XVII, 154 Seiten
ISBN: 978-3-89336-572-2
38. **Generalized detailed balance theory of solar cells**
by T. Kirchartz (2009), IV, 198 pages
ISBN: 978-3-89336-573-9
39. **The Influence of the Dynamic Ergodic Divertor on the Radial Electric Field at the Tokamak TEXTOR**
von J. W. Coenen (2009), xii, 122, XXVI pages
ISBN: 978-3-89336-574-6

40. **Sicherheitstechnik im Wandel Nuklearer Systeme**
von K. Nünighoff (2009), viii, 215 Seiten
ISBN: 978-3-89336-578-4
41. **Pulvermetallurgie hochporöser NiTi-Legierungen für Implantat- und Dämpfungsanwendungen**
von M. Köhl (2009), XVII, 199 Seiten
ISBN: 978-3-89336-580-7
42. **Einfluss der Bondcoatzusammensetzung und Herstellungsparameter auf die Lebensdauer von Wärmedämmschichten bei zyklischer Temperaturbelastung**
von M. Subanovic (2009), 188, VI Seiten
ISBN: 978-3-89336-582-1
43. **Oxygen Permeation and Thermo-Chemical Stability of Oxygen Permeation Membrane Materials for the Oxyfuel Process**
by A. J. Ellett (2009), 176 pages
ISBN: 978-3-89336-581-4
44. **Korrosion von polykristallinem Aluminiumoxid (PCA) durch Metalljodidschmelzen sowie deren Benetzungseigenschaften**
von S. C. Fischer (2009), 148 Seiten
ISBN: 978-3-89336-584-5
45. **IEF-3 Report 2009. Basic Research for Applications**
(2009), 217 Seiten
ISBN: 978-3-89336-585-2
46. **Verbundvorhaben ELBASYS (Elektrische Basissysteme in einem CFK-Rumpf) - Teilprojekt: Brennstoffzellenabgase zur Tankinertisierung - Schlussbericht**
von R. Peters, J. Latz, J. Pasel, R. C. Samsun, D. Stolten
(2009), xi, 202 Seiten
ISBN: 978-3-89336-587-6
47. **Aging of ¹⁴C-labeled Atrazine Residues in Soil: Location, Characterization and Biological Accessibility**
by N. D. Jablonowski (2009), IX, 104 pages
ISBN: 978-3-89336-588-3
48. **Entwicklung eines energetischen Sanierungsmodells für den europäischen Wohngebäudesektor unter dem Aspekt der Erstellung von Szenarien für Energie- und CO₂ - Einsparpotenziale bis 2030**
von P. Hansen (2009), XXII, 281 Seiten
ISBN: 978-3-89336-590-6

49. **Reduktion der Chromfreisetzung aus metallischen Interkonnektoren für Hochtemperaturbrennstoffzellen durch Schutzschichtsysteme**
von R. Trebbels (2009), iii, 135 Seiten
ISBN: 978-3-89336-591-3
50. **Bruchmechanische Untersuchung von Metall / Keramik-Verbundsystemen für die Anwendung in der Hochtemperaturbrennstoffzelle**
von B. Kuhn (2009), 118 Seiten
ISBN: 978-3-89336-592-0
51. **Wasserstoff-Emissionen und ihre Auswirkungen auf den arktischen Ozonverlust**
Risikoanalyse einer globalen Wasserstoffwirtschaft
von T. Feck (2009), 180 Seiten
ISBN: 978-3-89336-593-7
52. **Development of a new Online Method for Compound Specific Measurements of Organic Aerosols**
by T. Hohaus (2009), 156 pages
ISBN: 978-3-89336-596-8
53. **Entwicklung einer FPGA basierten Ansteuerungselektronik für Justageeinheiten im Michelson Interferometer**
von H. Nöldgen (2009), 121 Seiten
ISBN: 978-3-89336-599-9
54. **Observation – and model – based study of the extratropical UT/LS**
by A. Kunz (2010), xii, 120, xii pages
ISBN: 978-3-89336-603-3
55. **Herstellung polykristalliner Szintillatoren für die Positronen-Emissions-Tomographie (PET)**
von S. K. Karim (2010), VIII, 154 Seiten
ISBN: 978-3-89336-610-1
56. **Kombination eines Gebäudekondensators mit H₂-Rekombinatorelementen in Leichtwasserreaktoren**
von S. Kelm (2010), vii, 119 Seiten
ISBN: 978-3-89336-611-8
57. **Plant Leaf Motion Estimation Using A 5D Affine Optical Flow Model**
by T. Schuchert (2010), X, 143 pages
ISBN: 978-3-89336-613-2
58. **Tracer-tracer relations as a tool for research on polar ozone loss**
by R. Müller (2010), 116 pages
ISBN: 978-3-89336-614-9

59. **Sorption of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) to Yangtze River sediments and their components**
by J. Zhang (2010), X, 109 pages
ISBN: 978-3-89336-616-3
60. **Weltweite Innovationen bei der Entwicklung von CCS-Technologien und Möglichkeiten der Nutzung und des Recyclings von CO₂**
Studie im Auftrag des BMWi
von W. Kuckshinrichs et al. (2010), X, 139 Seiten
ISBN: 978-3-89336-617-0
61. **Herstellung und Charakterisierung von sauerstoffionenleitenden Dünnschichtmembranstrukturen**
von M. Betz (2010), XII, 112 Seiten
ISBN: 978-3-89336-618-7
62. **Politiksznarien für den Klimaschutz V – auf dem Weg zum Strukturwandel, Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030**
hrsg. von P. Hansen, F. Chr. Matthes (2010), 276 Seiten
ISBN: 978-3-89336-619-4
63. **Charakterisierung Biogener Sekundärer Organischer Aerosole mit Statistischen Methoden**
von C. Spindler (2010), iv, 163 Seiten
ISBN: 978-3-89336-622-4
64. **Stabile Algorithmen für die Magnetotomographie an Brennstoffzellen**
von M. Wannert (2010), ix, 119 Seiten
ISBN: 978-3-89336-623-1
65. **Sauerstofftransport und Degradationsverhalten von Hochtemperaturmembranen für CO₂-freie Kraftwerke**
von D. Schlehüser (2010), VII, 139 Seiten
ISBN: 978-3-89336-630-9
66. **Entwicklung und Herstellung von foliengegossenen, anodengestützten Festoxidbrennstoffzellen**
von W. Schafbauer (2010), VI, 164 Seiten
ISBN: 978-3-89336-631-6
67. **Disposal strategy of proton irradiated mercury from high power spallation sources**
by S. Chiriki (2010), xiv, 124 pages
ISBN: 978-3-89336-632-3
68. **Oxides with polyatomic anions considered as new electrolyte materials for solid oxide fuel cells (SOFCs)**
by O. H. Bin Hassan (2010), vii, 121 pages
ISBN: 978-3-89336-633-0

69. **Von der Komponente zum Stack: Entwicklung und Auslegung von HT-PEFC-Stacks der 5 kW-Klasse**
von A. Bendzulla (2010), IX, 203 Seiten
ISBN: 978-3-89336-634-7
70. **Satellitengestützte Schwerewellenmessungen in der Atmosphäre und Perspektiven einer zukünftigen ESA Mission (PREMIER)**
von S. Höfer (2010), 81 Seiten
ISBN: 978-3-89336-637-8
71. **Untersuchungen der Verhältnisse stabiler Kohlenstoffisotope in atmosphärisch relevanten VOC in Simulations- und Feldexperimenten**
von H. Spahn (2010), IV, 210 Seiten
ISBN: 978-3-89336-638-5
72. **Entwicklung und Charakterisierung eines metallischen Substrats für nanostrukturierte keramische Gastrennmembranen**
von K. Brands (2010), vii, 137 Seiten
ISBN: 978-3-89336-640-8
73. **Hybridisierung und Regelung eines mobilen Direktmethanol-Brennstoffzellen-Systems**
von J. Chr. Wilhelm (2010), 220 Seiten
ISBN: 978-3-89336-642-2
74. **Charakterisierung perowskitischer Hochtemperaturmembranen zur Sauerstoffbereitstellung für fossil gefeuerte Kraftwerksprozesse**
von S.A. Möbius (2010) III, 208 Seiten
ISBN: 978-3-89336-643-9
75. **Characterization of natural porous media by NMR and MRI techniques: High and low magnetic field studies for estimation of hydraulic properties**
by L.-R. Stingaciu (2010), 96 pages
ISBN: 978-3-89336-645-3
76. **Hydrological Characterization of a Forest Soil Using Electrical Resistivity Tomography**
by Chr. Oberdörster (2010), XXI, 151 pages
ISBN: 978-3-89336-647-7
77. **Ableitung von atomarem Sauerstoff und Wasserstoff aus Satellitendaten und deren Abhängigkeit vom solaren Zyklus**
von C. Lehmann (2010), 127 Seiten
ISBN: 978-3-89336-649-1

78. **18th World Hydrogen Energy Conference 2010 – WHEC2010**
Proceedings
Speeches and Plenary Talks
ed. by D. Stolten, B. Emonts (2010)
ISBN: 978-3-89336-658-3
- 78-1. **18th World Hydrogen Energy Conference 2010 – WHEC2010**
Proceedings
Parallel Sessions Book 1:
Fuel Cell Basics / Fuel Infrastructures
ed. by D. Stolten, T. Grube (2010), ca. 460 pages
ISBN: 978-3-89336-651-4
- 78-2. **18th World Hydrogen Energy Conference 2010 – WHEC2010**
Proceedings
Parallel Sessions Book 2:
Hydrogen Production Technologies – Part 1
ed. by D. Stolten, T. Grube (2010), ca. 400 pages
ISBN: 978-3-89336-652-1
- 78-3. **18th World Hydrogen Energy Conference 2010 – WHEC2010**
Proceedings
Parallel Sessions Book 3:
Hydrogen Production Technologies – Part 2
ed. by D. Stolten, T. Grube (2010), ca. 640 pages
ISBN: 978-3-89336-653-8
- 78-4. **18th World Hydrogen Energy Conference 2010 – WHEC2010**
Proceedings
Parallel Sessions Book 4:
Storage Systems / Policy Perspectives, Initiatives and Cooperations
ed. by D. Stolten, T. Grube (2010), ca. 500 pages
ISBN: 978-3-89336-654-5
- 78-5. **18th World Hydrogen Energy Conference 2010 – WHEC2010**
Proceedings
Parallel Sessions Book 5:
Strategic Analysis / Safety Issues / Existing and Emerging Markets
ed. by D. Stolten, T. Grube (2010), ca. 530 pages
ISBN: 978-3-89336-655-2
- 78-6. **18th World Hydrogen Energy Conference 2010 – WHEC2010**
Proceedings
Parallel Sessions Book 6:
Stationary Applications / Transportation Applications
ed. by D. Stolten, T. Grube (2010), ca. 330 pages
ISBN: 978-3-89336-656-9

78 Set (complete book series)

**18th World Hydrogen Energy Conference 2010 – WHEC2010
Proceedings**

ed. by D. Stolten, T. Grube, B. Emonts (2010)

ISBN: 978-3-89336-657-6

79. Ultrafast voltex core dynamics investigated by finite-element micromagnetic simulations

by S. Gliga (2010), vi, 144 pages

ISBN: 978-3-89336-660-6

80. Herstellung und Charakterisierung von keramik- und metallgestützten Membranschichten für die CO₂-Abtrennung in fossilen Kraftwerken

von F. Hauler (2010), XVIII, 178 Seiten

ISBN: 978-3-89336-662-0

81. Experiments and numerical studies on transport of sulfadiazine in soil columns

by M. Unold (2010), xvi, 115 pages

ISBN: 978-3-89336-663-7

82. Prompt-Gamma-Neutronen-Aktivierungs-Analyse zur zerstörungsfreien Charakterisierung radioaktiver Abfälle

von J.P.H. Kettler (2010), iv, 205 Seiten

ISBN: 978-3-89336-665-1

83. Transportparameter dünner geträgerter Kathodenschichten der oxidkeramischen Brennstoffzelle

von C. Wedershoven (2010), vi, 137 Seiten

ISBN: 978-3-89336-666-8

84. Charakterisierung der Quellverteilung von Feinstaub und Stickoxiden in ländlichem und städtischem Gebiet

von S. Urban (2010), vi, 211 Seiten

ISBN: 978-3-89336-669-9

85. Optics of Nanostructured Thin-Film Silicon Solar Cells

by C. Haase (2010), 150 pages

ISBN: 978-3-89336-671-2

86. Entwicklung einer Isolationsschicht für einen Leichtbau-SOFC-Stack

von R. Berhane (2010), X, 162 Seiten

ISBN: 978-3-89336-672-9

87. Hydrogen recycling and transport in the helical divertor of TEXTOR

by M. Clever (2010), x, 172 pages

ISBN: 978-3-89336-673-6

88. **Räumlich differenzierte Quantifizierung der N- und P-Einträge in Grundwasser und Oberflächengewässer in Nordrhein-Westfalen unter besonderer Berücksichtigung diffuser landwirtschaftlicher Quellen**
von F. Wendland et. al. (2010), xii, 216 Seiten
ISBN: 978-3-89336-674-3
89. **Oxidationskinetik innovativer Kohlenstoffmaterialien hinsichtlich schwerer Luftfeinbruchstörfälle in HTR's und Graphitentsorgung oder Aufarbeitung**
von B. Schlögl (2010), ix, 117 Seiten
ISBN: 978-3-89336-676-7
90. **Chemische Heißgasreinigung bei Biomassenvergasungsprozessen**
von M. Stemmler (2010), xv, 196 Seiten
ISBN: 978-3-89336-678-1
91. **Untersuchung und Optimierung der Serienverschaltung von Silizium-Dünnschicht-Solarmodulen**
von S. Haas (2010), ii, 202 Seiten
ISBN: 978-3-89336-680-4
92. **Non-invasive monitoring of water and solute fluxes in a cropped soil**
by S. Garré (2010), xxiv, 133 pages
ISBN: 978-3-89336-681-1
93. **Improved hydrogen sorption kinetics in wet ball milled Mg hydrides**
by L. Meng (2011), II, 119 pages
ISBN: 978-3-89336-687-3
94. **Materials for Advanced Power Engineering 2010**
ed. by J. Lecomte-Beckers, Q. Contrepolis, T. Beck and B. Kuhn
(2010), 1327 pages
ISBN: 978-3-89336-685-9
95. **2D cross-hole MMR – Survey design and sensitivity analysis for cross-hole applications of the magnetometric resistivity**
by D. Fielitz (2011), xvi, 123 pages
ISBN: 978-3-89336-689-7
96. **Untersuchungen zur Oberflächenspannung von Kohleschlacken unter Vergasungsbedingungen**
von T. Melchior (2011), xvii, 270 Seiten
ISBN: 978-3-89336-690-3
97. **Secondary Organic Aerosols: Chemical Aging, Hygroscopicity, and Cloud Droplet Activation**
by A. Buchholz (2011), xiv, 134 pages
ISBN: 978-3-89336-691-0

98. **Chrom-bezogene Degradation von Festoxid-Brennstoffzellen**
von A. Neumann (2011), xvi, 218 Seiten
ISBN: 978-3-89336-692-7
99. **Amorphous and microcrystalline silicon applied in very thin tandem solar cells**
by S. Schicho (2011), XII, 190 pages
ISBN: 978-3-89336-693-4
100. **Sol-gel and nano-suspension electrolyte layers for high performance solid oxide fuel cells**
by F. Han (2011), iv, 131 pages
ISBN: 978-3-89336-694-1
101. **Impact of different vertical transport representations on simulating processes in the tropical tropopause layer (TTL)**
by F. Plöger (2011), vi, 104 pages
ISBN: 978-3-89336-695-8
102. **Untersuchung optischer Nanostrukturen für die Photovoltaik mit Nahfeldmikroskopie**
von T. Beckers (2011), xiii, 128 Seiten
ISBN: 978-3-89336-696-5
103. **Impact of contamination on hydrogenated amorphous silicon thin films & solar cells**
by J. Wördenweber (2011), XIV, 138 pages
ISBN: 978-3-89336-697-2
104. **Water and Organic Nitrate Detection in an AMS: Laboratory Characterization and Application to Ambient Measurements**
by A. Mensah (2011), XI, 111 pages
ISBN: 978-3-89336-698-9
105. **Entwicklung eines neuen Konzepts zur Steuerung der thermischen Ausdehnung von glaskeramischen Verbundwerkstoffen mit angepasster Fließfähigkeit am Beispiel der Hochtemperatur-Brennstoffzelle**
von E. Wanko (2011), xi, 134 Seiten
ISBN: 978-3-89336-705-4
106. **Tomographic reconstruction of atmospheric volumes from infrared limb-imager measurements**
by J. Ungermann (2011), xiv, 153 pages
ISBN: 978-3-89336-708-5
107. **Synthese und Identifizierung von substituierten Mg-Al-Cl Doppelhydroxidverbindungen mit Schwerpunkt IR-Spektroskopie**
von B. Hansen (2011), XII, 121 Seiten
ISBN: 978-3-89336-709-2

108. **Analysis of spatial soil moisture dynamics using wireless sensor networks**
by U. Rosenbaum (2011), xxii, 120 pages
ISBN: 978-3-89336-710-8
109. **Optimierung von APS-ZrO₂-Wärmedämmschichten durch Variation der Kriechfestigkeit und der Grenzflächenrauigkeit**
von M. E. Schweda (2011), 168 Seiten
ISBN: 978-3-89336-711-5
110. **Sorption of a branched nonylphenol isomer and perfluorooctanoic acid on geosorbents and carbon nanotubes**
by C. Li (2011), X, 102 pages
ISBN: 978-3-89336-716-0
111. **Electron Transport in the Plasma Edge with Rotating Resonant Magnetic Perturbations at the TEXTOR Tokamak**
by H. Stoschus (2011), iv, 113 pages
ISBN: 978-3-89336-718-4
112. **Diffusion and Flow Investigations in Natural Porous Media by Nuclear Magnetic Resonance**
by N. Spindler (2011), viii, 144 pages
ISBN: 978-3-89336-719-1
113. **Entwicklung und Erprobung des Hygrometer for Atmospheric Investigations**
von T. Klostermann (2011), IV, 118 Seiten
ISBN: 978-3-89336-723-8
114. **Application of functional gene arrays for monitoring influences of plant/seasons on bacterial functions and community structures in constructed wetlands (Bitterfeld, Germany)**
by J. Ning (2011), xiv, 157 pages
ISBN: 978-3-89336-724-5
115. **Wasseraustrag aus den Kathodenkanälen von Direkt-Methanol-Brennstoffzellen**
von A. Schröder (2011), VII, 228 Seiten
ISBN: 978-3-89336-727-6
116. **CITYZEN Climate Impact Studies**
ed. by M. Schultz (2011), 45 pages
ISBN: 978-3-89336-729-0
117. **Software Tools zum interoperablen Austausch und zur Visualisierung von Geodatenätzen über das Internet**
von M. Schultz, M. Decker, S. Lührs (2011), iv, 156 Seiten
ISBN: 978-3-89336-730-6

118. **Optimierung eines Leichtbaudesigns für ein SOFC-Brennstoffzellenstack**
von T. Nguyen-Xuan (2011), III, 154 Seiten
ISBN: 978-3-89336-732-0
119. **Institute of Energy and Climate Research IEK-6:
Nuclear Waste Management & Reactor Safety Report 2009/2010
Material Science for Nuclear Waste Management**
ed. by M. Klinkenberg, S. Neumeier, D. Bosbach (2011), 242 pages
ISBN: 978-3-89336-735-1
120. **Fate of the Antibiotic Sulfadiazine in Yangtze River Sediments: Transformation, Sorption and Transport**
by N. Meng (2011), XII, 111 pages
ISBN: 978-3-89336-736-8
121. **Thermodynamische Eigenschaften gasförmiger und kondensierter Verbindungen für Hochtemperaturanwendungen**
von T. Markus (2011), II, 131 Seiten
ISBN: 978-3-89336-728-3
122. **Ein neues LIF-Instrument für flugzeug- und bodengebundene Messungen von OH- und HO₂-Radikalen in der Troposphäre**
von S. Broch (2011), IV, 160 Seiten
ISBN: 978-3-89336-742-9
123. **Processes in the Yangtze River System - Experiences and Perspectives**
Workshop-Proceedings
ed. by S. Küpper, G. Subklew, R.-D. Wilken (2011), 83 pages
ISBN: 978-3-89336-744-3
124. **Thermo-Mechanical Properties of Mixed Ion-Electron Conducting Membrane Materials**
by B. Huang (2011), 130 pages
ISBN: 978-3-89336-746-7
125. **Growth, Etching, and Stability of Sputtered ZnO:Al for Thin-Film Silicon Solar Cells**
by J. I. Owen (2011), xv, 192 pages
ISBN: 978-3-89336-749-8
126. **Entwicklung geträgerter Ba_{0,5}Sr_{0,5}Co_{0,8}Fe_{0,2}O_{3-δ} Sauerstoff-Permeationsmembranen**
von F. Schulze-Küppers (2011), ii, 119 Seiten
ISBN: 978-3-89336-752-8
127. **Development of the 2-Component-Injection Moulding for Metal Powders**
by A. P. Cysne Barbosa (2011), XIV, 150 pages
ISBN: 978-3-89336-753-5

128. **Performance of Tungsten-Based Materials and Components under ITER and DEMO Relevant Steady-State Thermal Loads**
by G. H. Ritz (2011), X, 128 pages
ISBN: 978-3-89336-755-9
129. **Experimentelle Bestimmung und numerische Simulation von Viskositäten in Schlackesystemen unter Vergasungsbedingungen**
von T. Nentwig (2011), 156 Seiten
ISBN: 978-3-89336-756-6



oder

